

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

М.А. Арбузов А.А. Жарковский

**МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА.
РАСЧЁТ ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ
В ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ГИДРОМАШИН**

Учебное пособие

Издательство Политехнического университета
Санкт-Петербург
2016

УДК 621.22:004.42 (075.8)

ББК 31.56:32.973.018я73

А 795

Р е ц е н з е н т ы:

Заслуженный работник высшей школы, доктор технических наук,
профессор Омского государственного технического университета

Щерба Виктор Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент Московского государственного
технического университета им. Н.Э. Баумана *Ломакин Владимир Олегович*

Арбузов М.А. **Механика жидкости и газа. Расчет вязкого течения в типовых элементах гидромашин** : учеб. пособие / М.А. Арбузов, А.А. Жарковский. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. -80 с.

Учебное пособие соответствует государственному образовательному стандарту дисциплины «Механика жидкости и газа» бакалаврской подготовки по направлению 13.03.03 «Энергетическое машиностроение», а также направлению подготовки аспирантов 15.06.01 «Машиностроение», направленность 15.06.01_12 «Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты» (научная специальность 05.04.13 «Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты»).

Рассматриваются простейшие типовые элементы гидромашин: труба, колено, диффузор, конфузор, внезапное расширение и сужение, дроссельная шайба. Для каждого типового элемента излагаются сведения о физике течения в нем, порядок расчёта и представления результатов с использованием пакета ANSYS CFX, методика расчёта. Даны общие сведения о пакете программ, расчётных сетках, моделях турбулентности, примерах пошагового расчёта течения в элементах на основе программных комплексов ANSYS CFX и SolidWorks. Приведены примеры решений.

Предназначено для студентов Института энергетики и транспортных систем, изучающих курсы «Механика жидкости и газа» и «Гидравлика» по профилю 13.03.03_05 «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» и другим профилям, связанным с математическим моделированием в гидравлических машинах.

Табл. 8. Ил. 69. Библиогр.: 7 назв.

Печатается по решению

Совета по издательской деятельности Ученого совета

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

© Арбузов М.А., Жарковский А.А., 2016

© Санкт-Петербургский политехнический

университет Петра Великого, 2016

ISBN 978-5-7422-2841-7

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список принятых сокращений.....	4
Введение.....	5
1. Работа в пакете программ ANSYS CFX.....	6
1.1. Общие сведения о пакете программ.....	6
1.2. Математическая модель течения вязкой жидкости и общие сведения о моделях турбулентности	8
1.3. Создание расчётной модели	16
1.4. Создание расчётной сетки	18
1.5. Запуск задачи на расчёт в ANSYS CFX.....	29
1.6. Отображение результатов	38
2. РАСЧЁТ ТЕЧЕНИЯ В ТРУБЕ	42
2.1. Общие сведения о течении жидкости в трубе.....	42
2.2. Варианты заданий	46
2.3. Выполнение расчёта	46
3. РАСЧЁТ ТЕЧЕНИЯ В КОЛЕНЕ	50
3.1. Общие сведения о течении жидкости в колене	50
3.2. Варианты задания	52
3.3. Выполнение расчёта	52
4. РАСЧЁТ ТЕЧЕНИЯ В ДИФФУЗОРЕ	59
4.1. Общие сведения о течении в расширяющемся канале	59
4.2. Варианты заданий	59
4.3. Выполнение расчёта	59
5. РАСЧЁТ ТЕЧЕНИЯ В КОНФУЗОРЕ	63
5.1. Общие сведения о течении в конфузоре	63
5.2. Варианты заданий	63
5.3. Выполнение расчёта	63
6. ТЕЧЕНИЕ ВО ВНЕЗАПНО РАСШИРЯЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ	65
6.1. Общие сведения о течении при внезапном расширении	65
6.2. Варианты заданий	67
6.3. Выполнение расчёта	67
7. ТЕЧЕНИЕ ВО ВНЕЗАПНО СУЖАЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ	70
7.1. Общие сведения о течении при внезапном расширении	70
7.2. Варианты заданий	71
7.3. Выполнение расчёта	72
8. РАСЧЁТ ТЕЧЕНИЯ И ПОТЕРЬ В ТРУБЕ С ДРОССЕЛЬНОЙ ШАЙБОЙ	76
8.1. Общие сведения о дроссельных шайбах	76
8.2. Варианты заданий	76
8.3. Выполнение расчёта	77
Библиографический список.....	80

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- ГУ – граничные условия
- CFD – Computational Fluid Dynamics (вычислительная гидродинамика)
- DES – Detached Eddy Simulation (метод отсоединенных вихрей)
- DNS – Direct Numerical Simulation (прямое численное моделирование)
- LES – Large Eddy Simulation (метод моделирования крупных вихрей)
- RANS – Reynolds Averaged Navier – Stokes (метод уравнений Рейнольдса)
- RSM – Reynolds Stress Modelling (модель Рейнольдсовых напряжений)
- RNG k - ε модель – Renormalization Group model (модель с использованием строгих статистических подходов)
- Realizable k - ε модель - модель Шина
- SA – Spalart – Allmares model (модель Спаларта – Аллмареса)
- SST – Shear Stress Transport model (модель сдвиговых напряжений)
- SW – Solid Works (графический пакет)
- URANS – Unsteady RANS (метод нестационарных уравнений Рейнольдса)

ВВЕДЕНИЕ

Целью учебного пособия является ознакомление студентов с пакетом прикладных программ ANSYS CFX на примере расчёта течения в изогнутой круглой трубе, диффузоре, внезапно расширяющемся и сужающемся канале, в трубе с дроссельной шайбой. Такие элементы являются типовыми для проточных частей гидромашин и умение рассчитывать течение в них необходимо для будущего специалиста в области гидромашиностроения.

Освоив работу с пакетом ANSYS на простейших гидравлических, студент сможет перейти к решению более сложных и важных с практической точки зрения гидравлических задач, которые отличаются от рассматриваемых в пособии примеров гораздо более сложной геометрией [1,2,3,4].

Расчёт течения вязкой жидкости ведётся на базе уравнений Навье-Стокса или Рейнольдса для турбулентного режима. Ввиду сложности задач гидродинамики для областей с произвольной конфигурацией решение этих уравнений осуществляется численными методами, которые запрограммированы и реализованы в виде пакетов прикладных программ, наиболее известные из которых Ansys CFX, Star CCM+, Numeca Fine Turbo, FlowVision.

Подготовка моделирования и расчёта течения жидкости в гидромашинах требует знания способов построения геометрии расчётных областей, расчётных сеток, задания граничных условий, моделей турбулентности, параметров решателя, способов обработки результатов численного эксперимента. Все эти знания студент должен приобрести в результате изучения пособия и практической реализации на компьютере заданий, содержащихся в нем.

1. РАБОТА В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ANSYS CFX

1.1. Общие сведения о пакете программ

ANSYS CFX – средство расчёта и анализа течения в областях сложной формы. Пакет совместим с операционными системами большинства компьютеров – это могут быть персональные компьютеры, рабочие станции, суперкомпьютеры. Отличительной чертой подобных комплексов можно назвать файловую совместимость всех электронных документов программного комплекса со всеми используемыми платформами. Из-за многоцелевой направленности и ориентированности появляется возможность использовать одну и ту же модель для решения не только гидродинамических задач, но и задач на прочность, задач по расчету температурных полей, влиянию магнитных полей и др. При создании модели на персональном компьютере, можно использовать её и на суперкомпьютере, что даёт всем пользователям программного комплекса хорошие возможности для решения разнообразного спектра сложных инженерных задач.

Для новичков и опытных пользователей этот комплекс программ даёт постоянно расширяющийся перечень расчётных возможностей. Они позволяют учесть многие конструктивные нелинейности. С их помощью можно в общем случае рассмотреть контактные задачи для поверхностей, допускающие существование некоторых (конечных) деформаций или углов поворота рассматриваемой модели. Программный комплекс позволяет выполнять интерактивную оптимизацию и анализ влияния

электромагнитных полей, получать решения для задач гидро- и аэродинамики и многое другое – вместе с параметрическим моделированием, адаптивным перестроением сетки и широкий спектр возможностей для создания макрокоманд с применением языка параметрического проектирования программы ANSYS.

ANSYS – это возможность создания компьютерной модели или обработки CAD-модели конструкции, изделия или его компонента. Сейчас прикладываются усилия для других проектных воздействий; рассматриваются отклики системы различной природы в качестве распределения напряжений и температур, электромагнитных полей. Программный комплекс применяется для оптимизации проектных разработок на ранних стадиях. Это позволяет значительно снизить стоимость продукции. Благодаря этому проектные организации уменьшают цикл разработки, который состоит из изготовления всевозможных прототипов для испытания и повторного изготовления уже усовершенствованных образцов. Кроме этого - позволяет избежать затратного процесса доработки изделий. В некоторых случаях испытание образцов может быть нежелательным или невозможным. Пользователи, использующие программный комплекс ANSYS, имеют возможность выявления возможных недостатков проекта и найти его наиболее приемлемый вариант до того, как начнётся изготовление или эксплуатация продукции. С помощью программы ANSYS можно сократить затраты на проектирование и изготовление и прибавить уверенности разработчику в правильности принятых им решений.

1.2. Математическая модель течения вязкой жидкости и общие сведения о моделях турбулентности

Течение вязкой жидкости в общем случае описывается полными уравнениями Навье-Стокса и уравнением неразрывности [1]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0. \quad (1.2)$$

Здесь использована сокращенная запись уравнений для несжимаемой жидкости, $i, j = 1 \dots 3$, предполагается суммирование по одинаковым индексам, x_1, x_2, x_3 – оси координат, t – время. Плотность ρ жидкости, а также газа при скоростях до числа Маха $M = 0.3$, полагается величиной постоянной. В качестве граничных условий, как правило, задается условие прилипания на всех твёрдых стенках (скорость равна нулю), распределение всех составляющих скорости во входном сечении, и равенство нулю первых производных (по направлению течения) составляющих скорости в выходном сечении. Если скорость потока на входе равномерна по сечению, пользователь задаёт на входе среднюю скорость (или расход). Давление входит в уравнения (1.1) лишь в виде первых производных, и пользователю требуется указать давление в какой-то одной точке расчётной области.

Параметры ламинарного течения находят из непосредственного решения уравнений Навье - Стокса (1.1-1.2). Для анализа турбулентных течений вместо уравнений (1.1) используют уравнения Навье – Стокса, осредненные по времени по Рейнольдсу и которые носят его имя:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u'_i u'_j}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad (1.3)$$

где $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3$ – осреднённые по времени значения скоростей; u'_1, u'_2, u'_3 – пульсационные составляющие скоростей. Для замыкания уравнений Рейнольдса используются различные модели турбулентности [4,5,6,7]. Приведём общие сведения о некоторых из них.

Алгебраическая модель. Модели данного типа называют алгебраическими, поскольку в них для расчёта турбулентной вязкости не прибегают к решению дифференциальных уравнений переноса:

$$\mu_t = \rho l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right|, \quad (1.4)$$

где y — координата по нормали к стенке, \bar{u} — касательная составляющая средней скорости, l_m — так называемая длина пути смешения (mixing length). Было установлено, что в пристеночной области длина пути смешения пропорциональна расстоянию до стенки:

$$l_m = ky, \quad (1.5)$$

где $k = 0,41$ — постоянная Кармана.

При использовании моделей данного типа возникает проблема достоверной оценки длины l_m . В связи с этим алгебраические модели, как правило, не рекомендуются для использования в коммерческих вычислительных пакетах Ansys Fluent и Ansys CFX.

Модель Спаларта–Аллмареса (SA). В моделях данного типа рассматривается одно уравнение переноса, записанное либо для кинетической энергии турбулентности, либо для турбулентной вязкости.

SA модель является низкорейнольдсовой и применяется во всей расчётной области, в том числе вблизи твёрдых стенок, на поверхностях которых в качестве граничного условия полагают скорость равной нулю. В этом случае вблизи твёрдых поверхностей требуется такая расчётная сетка, которая обеспечивает достаточно большое число элементов внутри пограничного слоя, в том числе — внутри вязкого подслоя. Однако в ANSYS CFX предусмотрено использование пристеночных функций, если разрешающая способность сетки в пристеночной области недостаточно велика.

SA модель оказывается экономичной и достаточно точной для расчётов безотрывного обтекания и для течений с не очень большими зонами отрыва. В то же время, точность модели не гарантирована для течений с большими зонами отрыва, свободных сдвиговых течений и затухающей турбулентности.

Стандартная k-ε модель. Формулировка k-ε модели, удобная для численных расчётов, получила широкое распространение после публикации в 1972 г. книги Б. Лаундера и Б. Сполдинга. В ней для

расчёта турбулентной вязкости используется формула Колмогорова–Прандтля, а для k и ε решаются уравнения переноса. Уравнение для k дано формулами, которые получены из уравнений Навье–Стокса и Рейнольдса с небольшим числом допущений (гипотеза турбулентной вязкости и моделирование слагаемого, описывающего турбулентную диффузию). Уравнение переноса для ε также было получено теоретически (Б.И. Давыдов, 1961 г.), но для его замыкания требуется гораздо больше упрощающих допущений и гипотез. В результате оказывается целесообразным рассматривать ε как поток энергии от крупных энергонесущих вихрей к более мелким, возникающий в каскадном процессе дробления вихрей, нечувствительном к молекулярной вязкости среды (вторая гипотеза Колмогорова).

Стандартная версия k – ε модели позволяет рассчитать некоторые турбулентные течения с точностью, достаточной для многих инженерных расчётов. Однако существуют определённые типы течений, где k – ε модель приводит к большим ошибкам: закрученные потоки, течения с большими неблагоприятными (способствующими отрыву) градиентами давления, течения с большими зонами отрыва, осесимметричные струи и некоторые другие. Стандартная k – ε модель имеет теоретическое обоснование только для полностью развитой турбулентности, поэтому в пристеночных узлах используются пристеночные функции.

RNG k - ε модель была разработана на основе строгих статистических методов (renormalization group theory). Она

аналогична стандартной k - ε модели, но имеет ряд существенных отличий:

- Дополнительное условие в уравнении скорости турбулентной диссипации ε улучшает точность решения высоконапряженных потоков.

- Добавлен дополнительный параметр, учитывающий циркуляцию турбулентности, который улучшает точность расчёта течений с закруткой потока.

- RNG теория предлагает аналитическую формулу турбулентных чисел Прандтля, в то время, как в стандартной k - ε модели данный параметр является константой.

- В то время, как стандартная k - ε модель является высокорейнольдсовой моделью, RNG теория предоставляет полученную аналитическим путём дифференциальную формулу эффективной вязкости, что более приемлемо при расчёте низкорейнольдсовых течений. Но стоит отметить, что данная формула работает при качественном сеточном разрешении в области пограничного слоя.

Эти особенности делают RNG k - ε модель более точной и надёжной для широкого диапазона турбулентных течений, чем в случае со стандартной k - ε моделью.

Realizable k - ε модель, предложенная Шином, учитывает следующие недостатки традиционных k - ε моделей:

-Новая формулировка турбулентной вязкости включает в себя параметр C_μ , который для различных областей потока принимает различные значения.

-Используется модель переноса скорости турбулентной диссипации ϵ . Модель базируется на динамическом уравнении пульсационных среднеквадратичных вихрей.

Непосредственное преимущество Realizable k - ϵ модели состоит в том, что она более точно предсказывает распределение диссипации плоских и круглых струй. Это также вероятно обеспечит лучшее предсказание вращающихся потоков, пограничных слоёв, подверженных сильным градиентам давления, отрывных течений и рециркуляционных потоков.

Модели Realizable и RNG k - ϵ должны иметь преимущество по сравнению со стандартной k - ϵ моделью турбулентности для искривленных, вихревых и вращающихся потоков.

У Realizable k - ϵ модели турбулентности имеется недостаток, который заключается в том, что она может завышать или занижать турбулентную вязкость потока, когда вычислительная область содержит одновременно вращающиеся и неподвижные области. Это объясняется тем, что модель использует эффект осреднённого вращения при определении турбулентной вязкости.

Модели k - ω и SST (модель сдвиговых напряжений Ментера). Опыт расчёта отрывных турбулентных течений за плохообтекаемыми телами показал, что модели на основе уравнения для скорости диссипации ϵ предсказывают начало отрыва потока значительно ниже по течению, чем это наблюдается в экспериментах,

причём расчётный размер рециркуляционной зоны и интенсивность движения в ней оказываются заниженными. В то же время оказалось, что другой класс моделей, где вместо уравнения переноса для ε используется уравнение для $\omega = \varepsilon/k$ (turbulence frequency — величина, обратная времени жизни крупных вихрей, приводит к лучшему согласованию с экспериментом на данном классе течений, если зона отрыва невелика. Так называемая $k-\omega$ модель развивалась в работах Д. Вилкокса и легла в основу комбинированной модели сдвиговых напряжений (shear stress transport), созданной позднее Ф. Ментером и объединяющей $k-\omega$ и $k-\varepsilon$ модели.

В SST модели первая функция-переключатель осуществляет выбор между $k-\omega$ (вблизи поверхностей) и $k-\varepsilon$ (вдали от поверхностей) моделями, а вторая активирует ограничитель в формуле для турбулентной вязкости. Уравнения $k-\omega$ модели применимы в пограничном слое вплоть до поверхности стенки, что требует разрешения вязкого подслоя. Вместе с этим, поскольку $\omega \rightarrow \infty$ при $y \rightarrow 0$, для расчёта значения ω на поверхности стенки используется специальный алгоритм. SST модель хорошо зарекомендовала себя в расчётах отрывных течений с небольшой зоной отрыва.

Модель Рейнольдсовых напряжений (RSM, Reynolds Stress Model) и является одной из самых сложных моделей турбулентности предлагаемых ANSYS. Эта модель не использует предположение о изотропности турбулентной вязкости, а для замыкания уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, решает уравнения переноса для Рейнольдсовых напряжений совместно с уравнением

для скорости турбулентной диссипации ε . Так как модель RSM описывает эффекты кривизны, закрученности, вращения, резкого изменения напряжений между слоями более строго, чем одно- и двухпараметрические модели турбулентности, то она имеет больший потенциал для более точного расчета сложных потоков. Однако RSM модель все-таки имеет некоторые упрощения, которые были приняты для составления уравнений переноса Рейнольдсовых напряжений. Использование этой модели турбулентности рекомендуется в случаях, когда анизотропность турбулентного потока оказывает доминирующее влияние на характер турбулентного течения (циклоны, сильно закрученные потоки в камерах сгорания, вращающиеся области, вторичные течения в каналах, вызванные большими нормальными напряжениями и т.д.).

Вихреразрешающие методы – DNS, LES, DES.

Метод прямого численного моделирования (DNS, Direct Numerical Solution). В методе решаются 3-е мерных нестационарные уравнения Навье – Стокса с использованием пространственных сеток и шагов интегрирования по времени, достаточных для разрешения всех существенных для рассматриваемого течения пространственно - временных неоднородностей. Требуется очень мелкие сетки, необходимое число которых резко увеличивается с ростом числа Рейнольдса. Позволяет разрешать крупные и мелкие вихри. Применяется для расчёта простых турбулентных течений при низких числах Рейнольдса $Re \sim 10^3$.

Метод крупных вихрей (LES, Large Eddy Simulation (метод моделирования крупных вихрей). Метод основан на пространственной «фильтрации» системы 3-х мерных нестационарных уравнений Навье – Стокса. Перенос импульса и энергии крупными энергонесущими структурами рассчитывается точно, а эффект мелких неразрешаемых масштабов учитывается через «подсеточные» напряжения, которые подлежат моделированию.

Метод отсоединенных вихрей (DES, Detached Eddy Simulation) сочетает сильные стороны RANS (экономичность и надежность расчёта безотрывных течений) с возможностью расчёта течений с обширными зонами отрыва, обеспечиваемой LES. Метод использует уравнения Рейнольдса в областях потока, где локальный размер вычислительной сетки недостаточен для разрешения турбулентных структур с минимальным характерным масштабом турбулентности, и метод LES в остальной области потока. С помощью DES удастся рассчитывать сложные отрывные течения.

1.3. Создание расчётной модели

Для удобства навигации по собственным работам рекомендуется для каждой работы создавать отдельную папку.

ВНИМАНИЕ! Путь к папке не должен содержать в себе кириллицы, в том числе и имя пользователя. Это необходимо для корректного запуска пакета программ ANSYS.

Для выполнения любого расчёта в пакете программ ANSYS необходимо иметь модель течения или конструкции. Для создания моделей можно использовать различные системы автоматического

проектирования. В данном пособии используется графический пакет программ SolidWorks (SW) [5].

Создание моделей происходит следующим образом: в пакете программ SW создаём «Деталь». Затем нужно построить эскиз исследуемой модели, которую можно получить путём вращения или вытягивания этого эскиза. Рекомендуется строить эскизы из центра координат (исходная точка), а размеры задавать с помощью «Автоматического нанесения размеров», как это показано на рис. 1.1 для работы №1. Затем выходим из эскиза (в правом верхнем углу). После этого вытягиваем бобышку на необходимую длину по заданию, используя во вкладке «Элементы» функцию «Вытянутая бобышка/основание» на нужную длину, если же создан эскиз вращения, необходимо выбрать во вкладке «Элементы» функцию «Повёрнутая бобышка/основание» как показано на рис. 1.2. Полученную модель потока жидкости теперь следует перевести в формат Parasolid (.X_t) или Step (.step). Это осуществляется сохранением модели в другом формате (сохранить как...). Теперь полученная модель готова для работы в ANSYS и можно закрыть SW и открыть сеточный генератор ICEM CFD, в котором необходимо создать сетки обычную и призматическую у обтекаемых стенок.

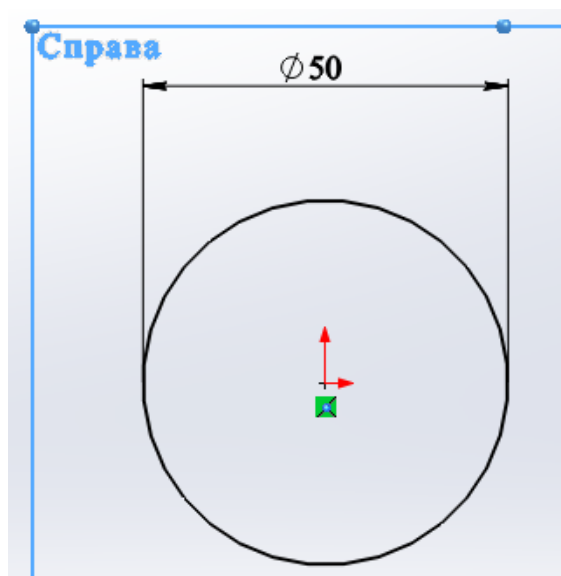


Рис. 1.1. Эскиз - окружность

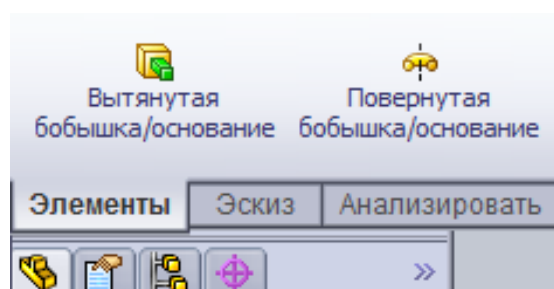


Рис.1.2. Вытягивание трубы из эскиза

1.4. Создание расчётной сетки

Построение расчётной сетки – это процесс разбиения расчётной области на множество отдельных ячеек. Ячейки сетки, как правило, представляют собой тетраэдры, гексаэдры, призмы или пирамиды (рис. 1.3). Точки, расположенные в углах или в центре ячеек – узлы расчётной сетки. В результате численного решения уравнений математической модели именно в узлах расчётной сетки и определяются искомые параметры течения.

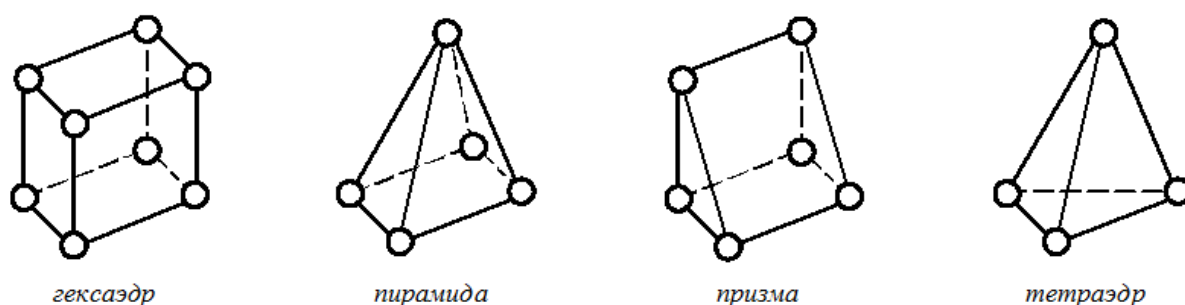


Рис. 1.3. Типы ячеек расчётной сетки

Основное требование к расчётной сетке – она должна быть достаточно густой, чтобы разрешить физические эффекты, происходящие внутри расчётной области. Для достижения равномерной точности расчёта узлы сетки должны более густо располагаться в местах больших градиентов параметров течения, в частности, у стенок. Кроме того, при построении сетки необходимо избегать получения чрезмерно вытянутых или перекошенных ячеек, форма которых слишком сильно отличается от правильных многогранников, – при наличии таких ячеек может быть затруднено получение сходящегося решения.

Различают структурированные и неструктурированные расчётные сетки. В неструктурированных расчётных сетках узлы сетки разбрасываются в пространстве случайным образом, согласно задаваемому закону плотности расположения узлов. Это делает возможным построение сетки внутри области сколь угодно сложной формы. Однако разностные аналоги уравнений математической модели на такой сетке оказываются громоздкими. Для построения структурированной сетки расчётная область разбивается на блоки согласно некоторой, задаваемой пользователем, топологии разбивки,

и в пределах каждого блока строится расчётная сетка, на узлы которой можно ссылаться по номерам 3-мерного массива. Применение такой сетки позволяет организовать наиболее экономичные алгоритмы расчёта.

На рис. 1.4 представлены фрагменты структурированной и неструктурированной расчётных сеток.

При выполнении серьёзных расчётов проводится исследование на сеточную сходимость (независимость решения от качества расчётной сетки) – расчёты проводятся на нескольких сетках, различающихся количеством контрольных объемов, чтобы выявить, начиная с какого количества контрольных объемов получаемое решение перестает зависеть от количества элементов расчётной сетки.

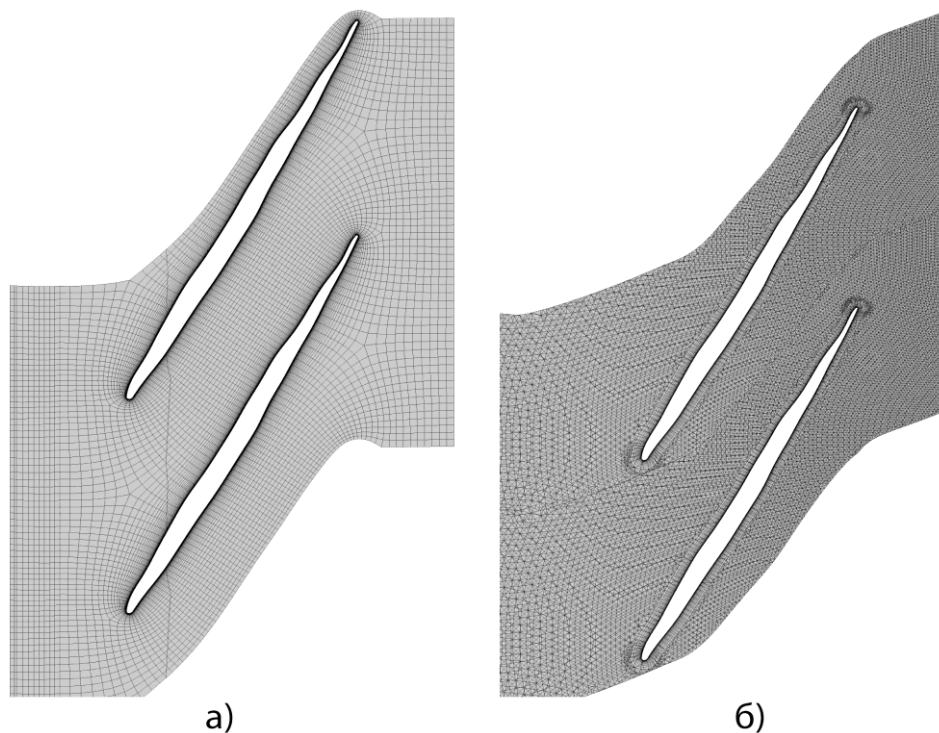



Рис. 1.4. Структурированная (а) и неструктурированная (б) расчётные сетки

Подгружается созданная модель следующим образом: во вкладке «File» выбираем «Import model» или через «Workbench» в зависимости от версии ANSYS. После того, как полученная модель потока подгрузится в сеточный генератор, необходимо обозначить все её поверхности. Для отображения поверхностей в древе проекта необходимо раскрыть вкладку геометрии «Geometry» и отобразить все поверхности «Surfaces», как это показано на рис.1.5.

Для удобства отображения можно включить твёрдотельный вид модели (Solid Simple Display ).

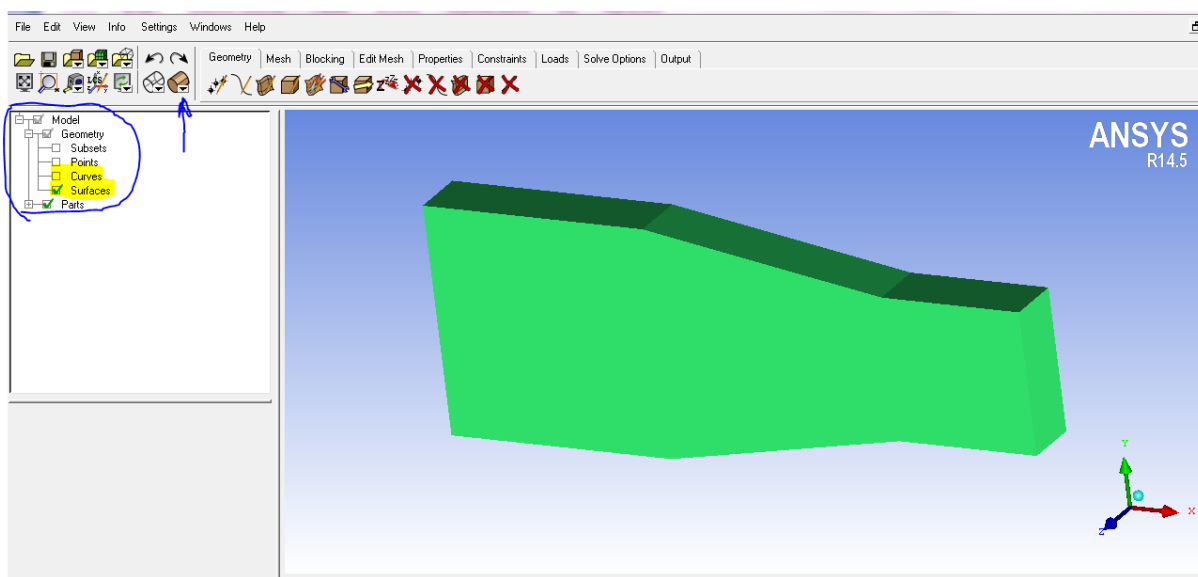


Рис. 1.5. Импорт модели потока

Далее следует создать различные поверхности, которые необходимы для разделения граничных условий. Для этого нужно раскрыть папку "parts" и приступить к разделению в следующей последовательности:

- 1) Наводим курсор мыши на "parts" и нажимаем правую

клавишу, выбираем "create part". Далее нажимаем на стрелку "select items" и выбираем нужные нам поверхности. *Левая клавиша мыши – выбор элемента, правая – отменить выбор, средняя – подтвердить выбор.* Нажав клавишу F9 можно клавишами мыши вращать и перемещать модель.

2) Как правило, начинают с простых поверхностей. Рекомендуется начать со входа в проточную часть: нажимаем на стрелку "select items", потом левой клавишей мыши на поверхность входа, потом нажимаем среднюю кнопку мыши (выбранная поверхность выделится темным цветом). В древе проекта появится новая часть. Нажимаем на галочку напротив новой части: поверхность входа должна скрыться из рабочего пространства. Задать имя нужной поверхности можно либо на этапе выбора соответствующей части, либо переименовав уже готовую разделенную часть. Назовём такую поверхность «Inlet». Когда поверхностей много, можно выбирать их левой кнопкой мыши. После того как все поверхности выбраны, нужно 2 раза нажать на колёсико мыши.

3) Аналогичная последовательность выполняется для всех поверхностей с соответствующим присвоением им имен:

«Inlet» - поверхности входа; «Outlet» - поверхности выхода; «Symmetry» - поверхности симметрии; «Wall» - поверхности стенок.

Следует отметить, что при начале выбора поверхностей для поворота, вращения или перемещения модели нужно обязательно зажимать клавишу «Ctrl».

После создания модели течения переходим к этапу создания

ячеек расчётной сетки проточной части. Для этого во вкладке "Mesh" выбираем иконку "Global mesh setup", чтобы задать там максимальный размер элемента (рис. 1.6).

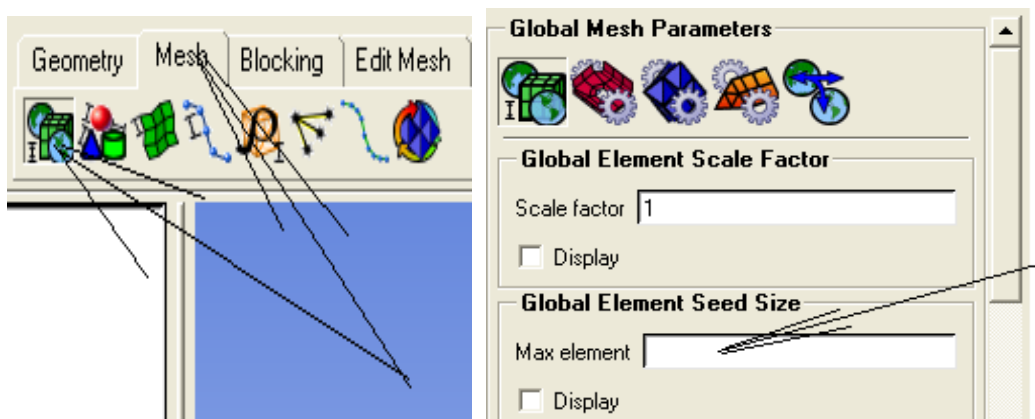


Рис.1.6. Вкладка – "Global mesh setup"

В первом приближении, можно принять максимальный размер элемента - 10-20% от характерного диаметра D . "Max element" - определяет максимальный размер ячейки во всей расчётной области.

После проделанных выше действий переходим к генерации сетки. Для этого нажимаем на вкладку "Compute Mesh". Выбираем иконку с надписью "Volume Mesh", в строке "Mesh Type" должно стоять "Tetra/Mixed" (рис. 1.7).

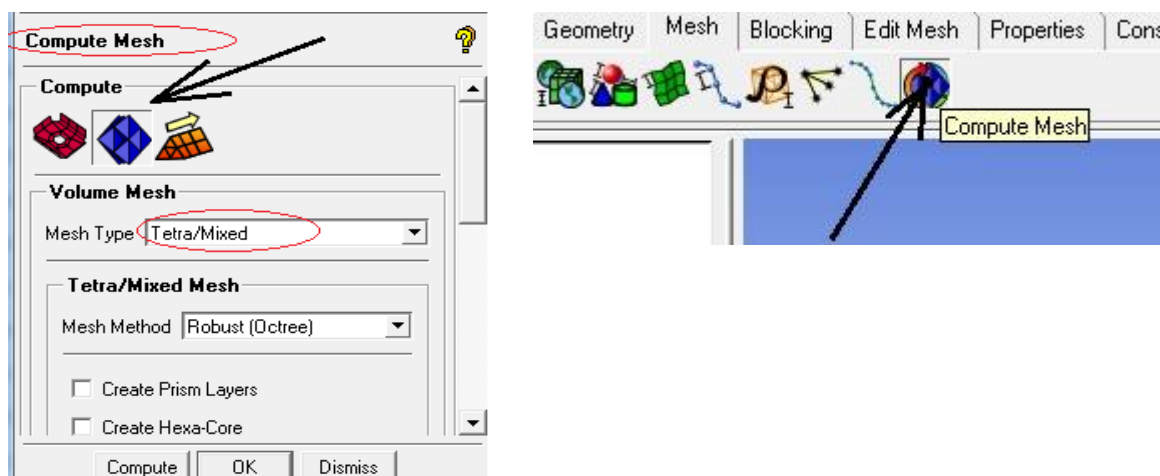


Рис.1.7. Вкладка – "Compute Mesh"

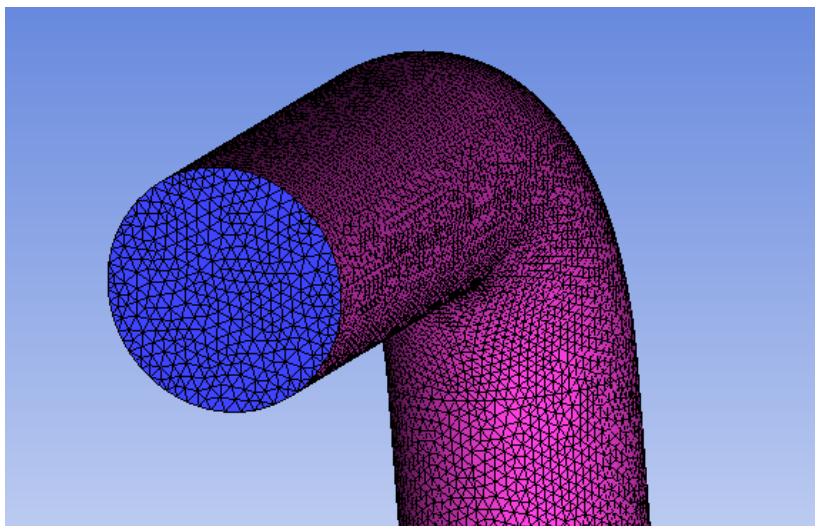


Рис.1.8. Сгенерированная объёмная сетка

В окне статистики после успешного завершения генерации сетки можно посмотреть количество сгенерированных элементов (Total elements).

После генерации объёмных ячеек рекомендуется сохранить проект.

Наиболее интересны участки на поворотах, сужениях, расширениях и т.п. Кроме того, обязательно необходимо учитывать наличие пограничного слоя в протекающей жидкости и, учитывая прилипание жидкости к стенкам, рассматривать более подробно течение возле стенок. Для этого следует создать слои с призматическими ячейками.

Если течение в расчётной области турбулентное (об этом можно судить исходя из высокого значения числа Рейнольдса), то в пограничном слое трубопровода необходимо сгенерировать призматические слои, которые удовлетворяют нескольким основным правилам:

1) Правильный выбор размера первого элемента сетки вблизи твердых стенок:

- при применении высокорейнольдсовых моделей турбулентности (например, k-ε) ближайший к стенке элемент должен попадать в область логарифмического подслоя ($Y_+ = 30$). Так как параметры потока в различных

областях расчетной области меняются, то изменяется и параметр Y_+ , поэтому на практике нужно стремиться, чтобы значение Y_+ находилось в диапазоне от 10 до 60 (не более 100);

- при применении низкорейнольдсовых моделей турбулентности (например, SST) ближайший к стенке элемент должен попадать в область ламинарного подслоя, поэтому значение Y_+ должно быть не более 2.

2) Необходимое количество элементов по толщине пограничного слоя:

- для высокорейнольдсовых моделей турбулентности минимум 10 элементов;

- для низкорейнольдсовых моделей турбулентности минимум 15 элементов.

3) Плавность увеличения элементов сетки. Первые два условия определяют коэффициент увеличения элементов в области пограничного слоя. Обычно он находится в пределах 1,1 – 1,5.

Размер элементов в ядре потока из-за ограниченности ресурсов компьютера обычно превышает размер толщины пограничного слоя, поэтому количество призматических элементов обычно принимается большим, для того, чтобы основной элемент сетки был не более чем в 1,5 раза больше последнего призматического, однако, превышение не критично.

На основе критериев создаем призматические слои у стенок рассматриваемой проточной части "Wall". Для этого во вкладке "Global mesh setup" / "Prism meshing parameters" нужно задать высоту первого слоя (рис. 1.9).

Размер ближайшего (первого) к стенке элемента определим по формуле (1.1) (в качестве масштаба длины принимаем диаметр проточной

части D):

$$\Delta_1 = D \cdot Y_+ \cdot \sqrt{74} \cdot \text{Re}^{-13/14}, \quad (1.6)$$

где: 1) Initial height – размер ближайшего к стенке элемента (Δ_1);

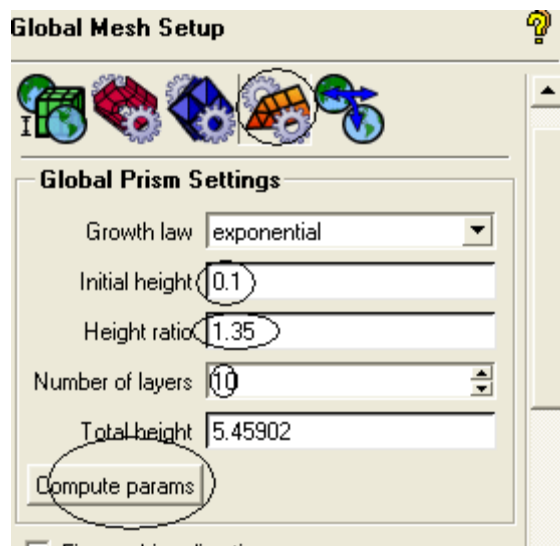


Рис. 1.9. Задание параметров призматических слоев

2) Height ratio – коэффициент роста (обычно задается в диапазоне 1,1 – 1,5);

3) Number of layers – количество призматических слоев (минимум 10 – для высокорейнольдсовых, 15 – для низкорейнольдсовых моделей турбулентности);

4) Total height – суммарная толщина призматических слоев.

Если размер глобального элемента больше чем в 1,5 раз превышает толщину последнего призматического слоя, то желательно уменьшить значение глобального размера элементов с перестроением тетраэдральной сетки или увеличить количество призматических слоев (при этом не важно, что суммарная толщина призматических элементов будет превышать расчетную толщину пограничного слоя). Обычно используют оба подхода.

Определить толщину последнего призматического слоя можно

уменьшив на 1 количество слоев и повторно нажать кнопку "Compute params" (Разница в значениях "Total height").

Определив и утвердив все параметры нужно нажать кнопку "Ok". Во вкладке "Compute mesh" нужно выбрать "Prism mesh" / "Select parts for prism layer". Затем выбрать поверхности, на которых будут созданы призматические слои, в нашем случае это стенки "Wall". Нажать кнопку "apply", закрыть окно и нажать кнопку "Compute". Пример призматических слоев показан на рис. 1.10.

Если призматические ячейки были созданы некорректно следует попробовать изменить параметры задания ячеек – увеличить или уменьшить первый слой, количество слоёв, увеличивающий коэффициент и т.п. Если ничего из этого не помогло, следует загрузить ранее сохранённый проект и попробовать изменить значения для призматического слоя, либо попробовать сохранить модель проекта в другом формате и импортировать его (если был создан в Parasolid, попробовать формат Step или наоборот).

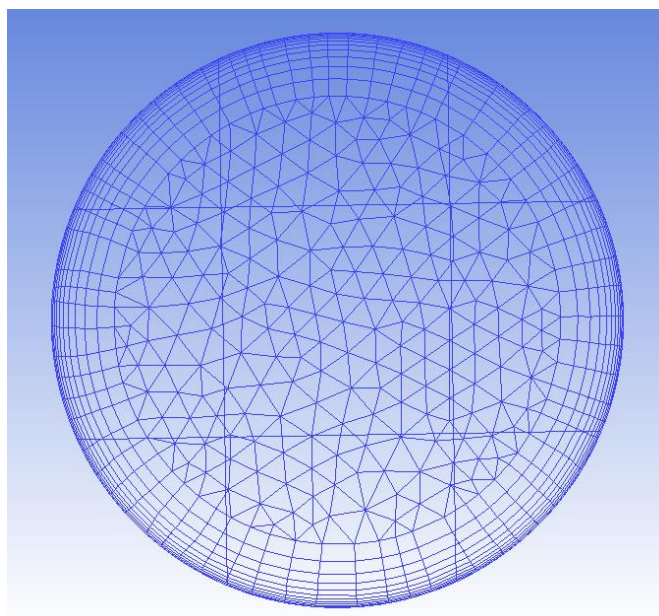


Рис.1.10. Призматический слой

После успешного создания призматических слоев нужно сохранить проект и экспортировать сетку: нажать во вкладке "Output"/ "Select solver". Выбрать решатель "ANSYS CFX". Затем нажать "Ok", и далее кнопку "Write input" (рис.1.11). В появившемся окне нажать "Done".

Работа с сеточным генератором закончена и его можно закрыть, предварительно сохранив проект, если это необходимо.

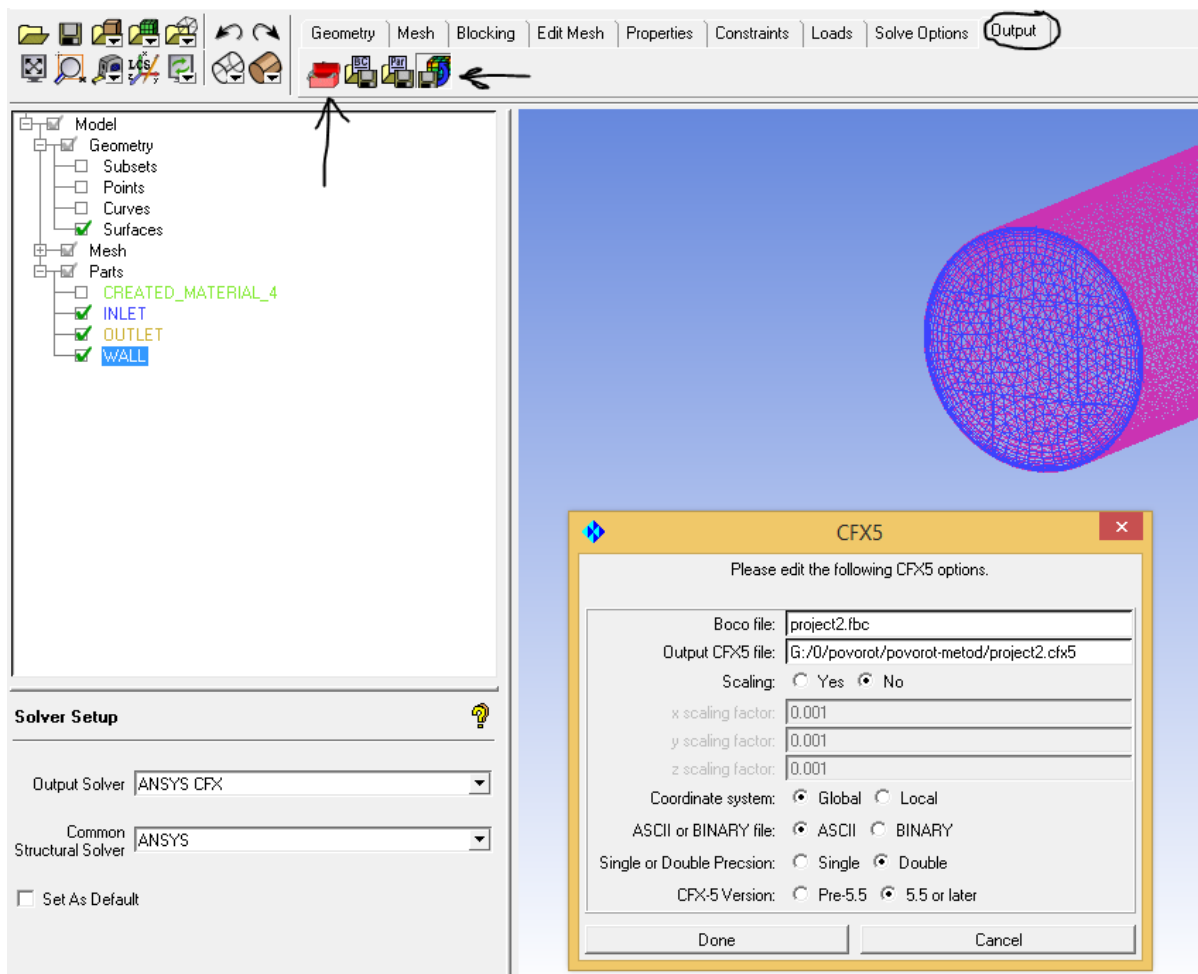


Рис.1.11. Экспорт данных в решатель ANSYS CFX

1.5. Запуск задачи на счёт в ANSYS CFX

Исходными данными для программы ANSYS CFX является наличие расчетной сетки. Ресурсоёмкость расчётов и адекватность получаемых результатов в значительной мере зависят от задаваемых в программе параметров и граничных условий. Таких как:

- тип задачи (стационарная или нестационарная);
- модель турбулентности;
- вид условия сопряжения, задаваемого на поверхности интерфейса;
- значение невязок.

Большое влияние на скорость решения задачи оказывают параметры вычислительной техники: количество ядер процессора, его частота, объём оперативной памяти. И здесь ANSYS CFX, может значительно сократить время расчёта, так как в нём реализована поддержка многопроцессорности.

После запуска программы появляется окно загрузчика CFX Launcher (рис. 1.12). Выбираем рабочую папку (путь к ней должен быть прописан строго латинскими символами!). Запускаем модуль препроцессора ANSYS CFX.

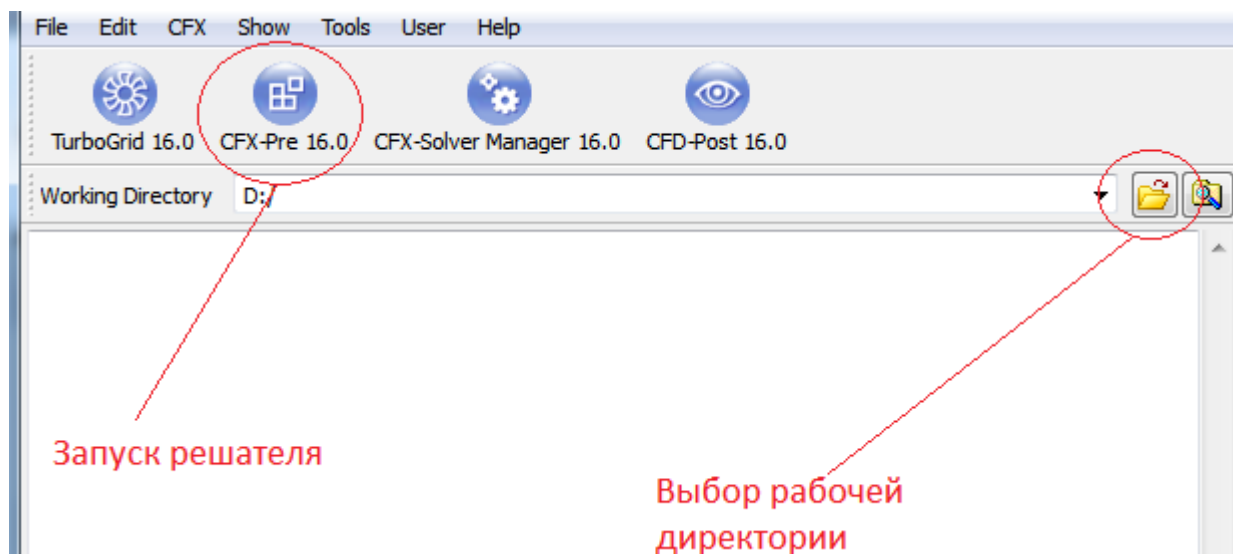


Рис.1.12. CFX Launcher

В появившемся окне препроцессора CFX создаем новый проект "New case". Затем выбираем тип симуляции "General" ("Turbomachinery" – для проточных частей, в которых присутствуют вращающиеся элементы и вращение в целом). Далее в дереве проекта необходимо правой кнопкой мыши нажать на строку "Mesh" и затем выбрать "Import Mesh" / "ICEM CFD" и загрузить ранее созданную сетку, как показано на рис.1.13.

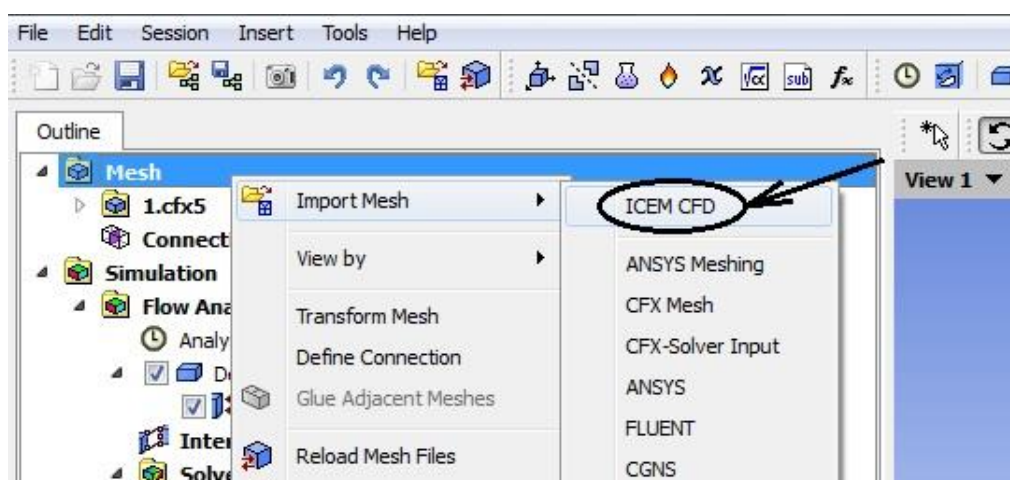


Рис.1.13. Импортрование сетки в ANSYS CFX

После успешного импортирования сетки, не забыв поставить миллиметры, как размерность, переходим к настройке условий расчёта, а также к заданию граничных условий.

Для начала, необходимо задать граничные условия для поверхностей "Inlet" / "Outlet". В древе проекта находим "Default Domain", щелкаем по нему правой кнопкой мыши, выбираем "Insert"/"Boundary" (рис.1.14). В появившемся окне называем область соответственно интересующей нас, "Inlet", чтобы программа самостоятельно определила ее тип по названию. Затем переключаем вкладку на "Boundary Details" и в окошке "Mass And Momentum" задаем данные создаваемой граничной области, для входной области это может быть как входная скорость "Normal Speed", так и расход/давление, в зависимости от постановки задачи и расчетной области. Нажимаем "ОК" (рис. 1.15).

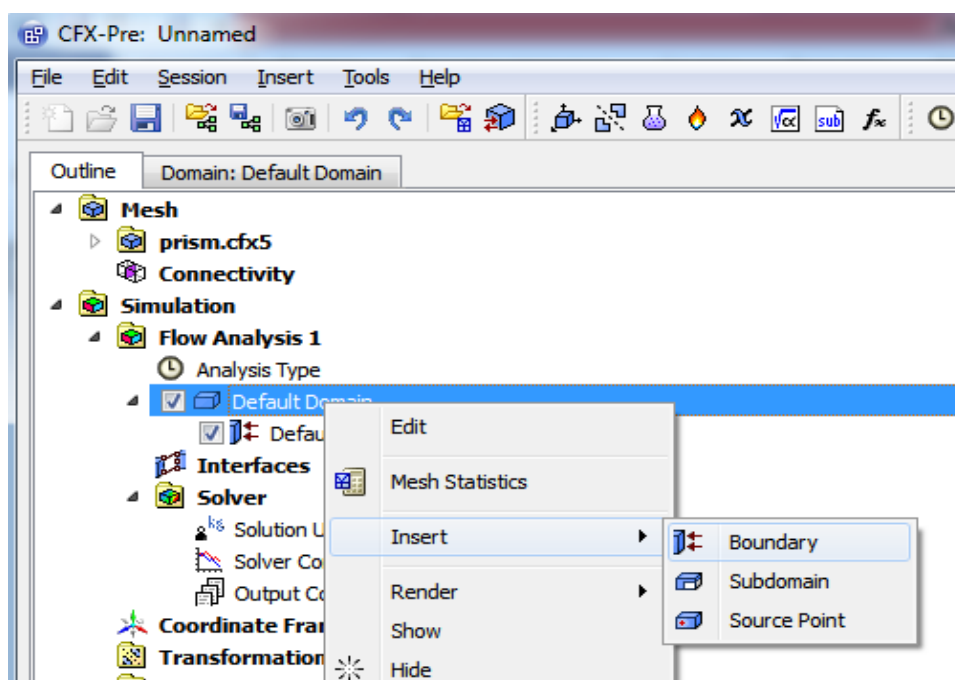


Рис.1.14. Задание граничных условий для областей

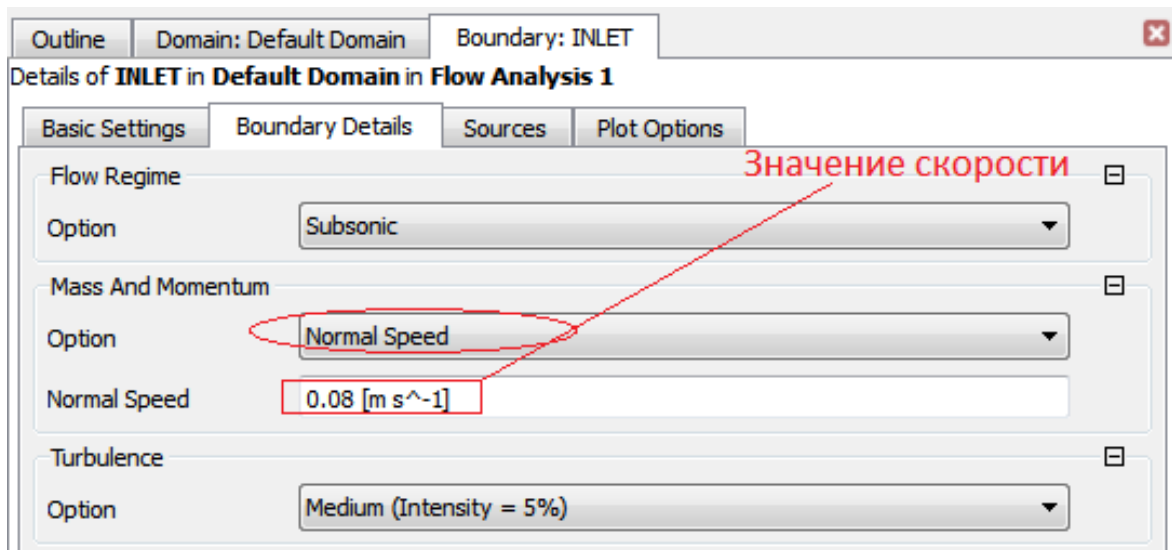


Рис.1.15. Граничные условия для входной поверхности Inlet

Продельываем вышеописанные операции для Outlet, во вкладке "Boundary Details" повторяем все, согласно рис. 1.16.

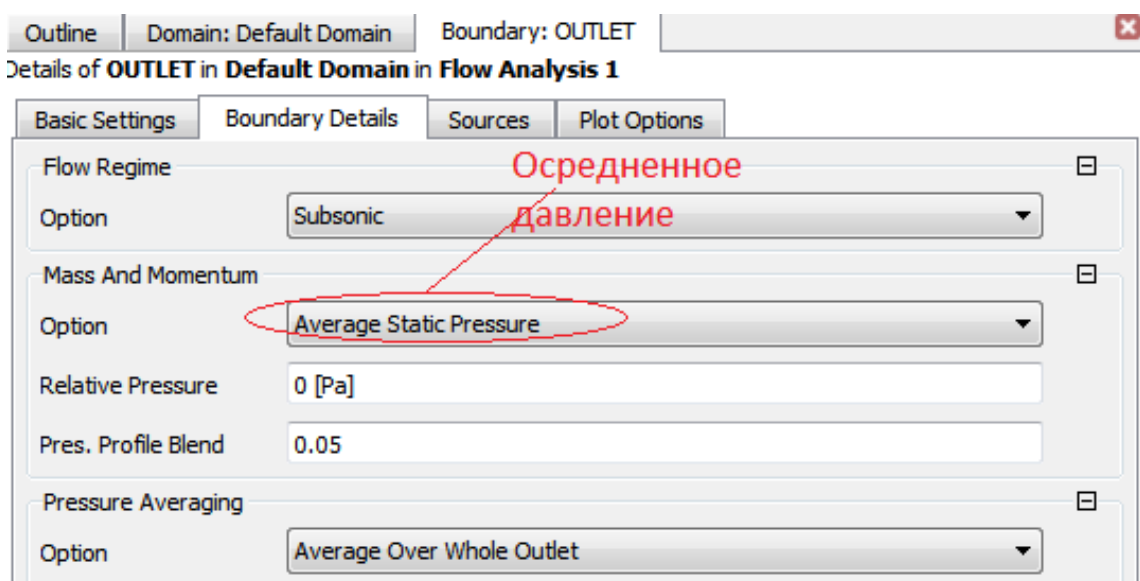


Рис.1.16. Граничные условия для выходной поверхности Outlet

Для настройки общих параметров расчета все в том же дереве переходим и выбираем пункт "Default Domain"/ "Edit", видим на экране интерфейс настройки расчетной области. Так как в трубе протекает вода, необходимо в строке "Material" заменить "Air at 25 C" на воду "Water". Ранее, при задании граничных условий для Outlet мы задали осредненное давление равное 0 Па, теперь в строке Reference Pressure задаем значение 1 атм или 10^5 Па. Остальное оставляем без изменений (рис.1.17).

Теперь переходим во вторую вкладку в том же окне "Fluid Models" и задаем следующие параметры (рис. 2.24):

1) "Heat Transfer"/"Option"/"None" (жидкость в нашем случае несжимаемая, теплообмен не рассматривается).

2) "Turbulence"/"Option"/"k-Epsilon" либо "SST" (Модель турбулентности выбираем в зависимости от того, на какое значение был рассчитан Y_+).

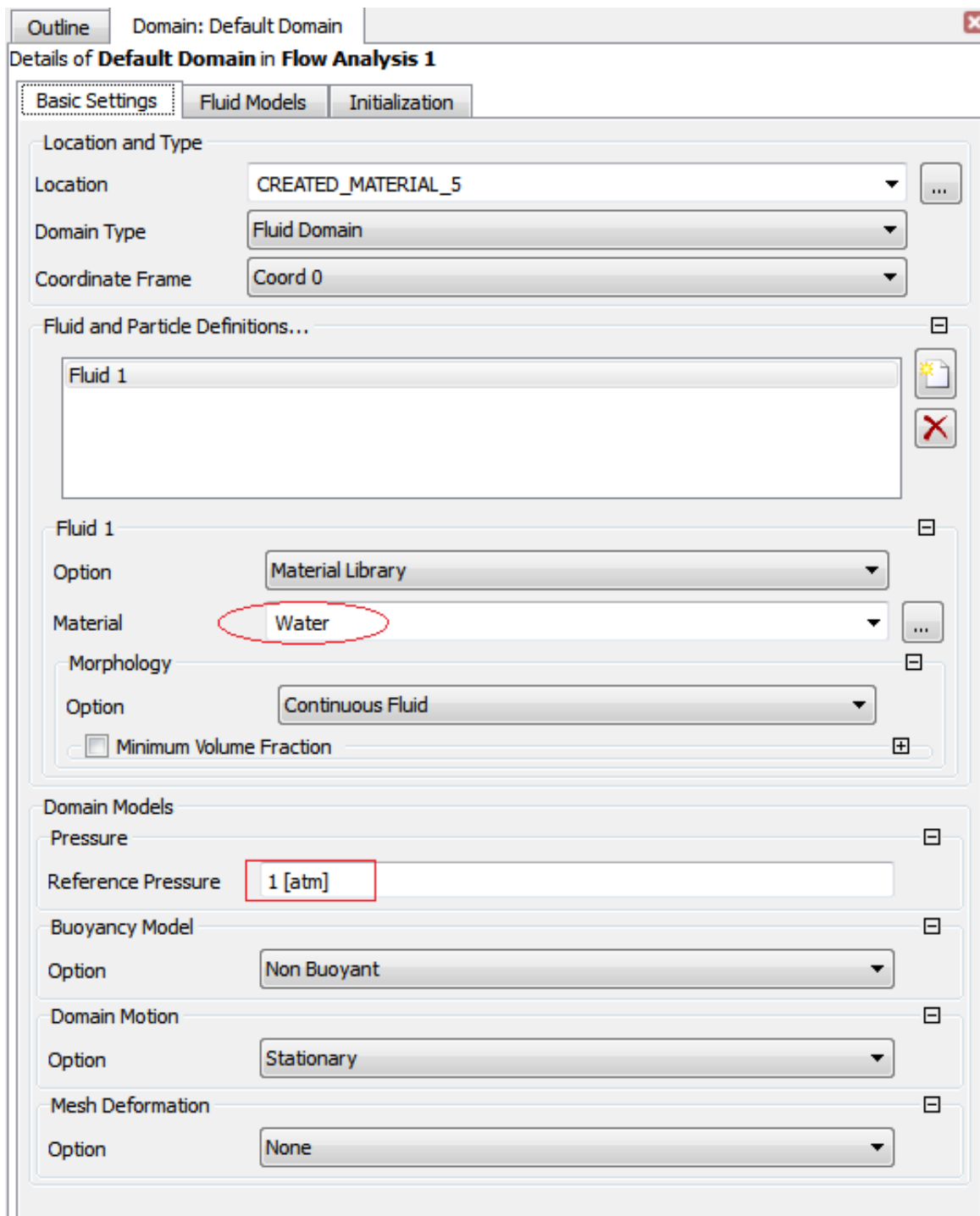


Рис.1.17. Окно настройки параметров рабочей среды

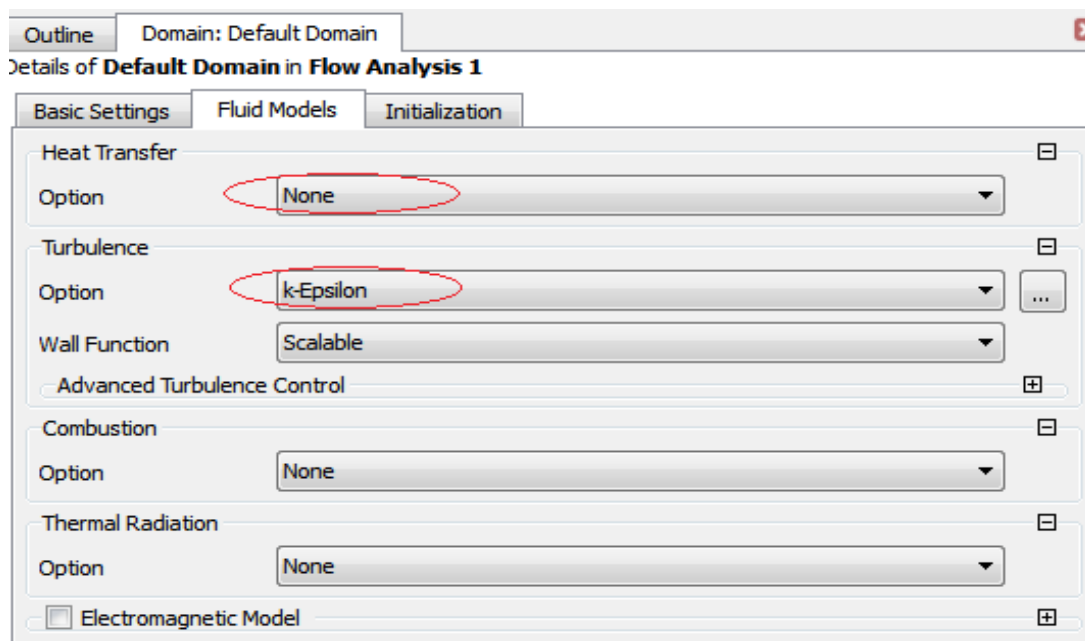


Рис.1.18. Окно выбора модели турбулентности

Остальные параметры не изменяем. Нажимаем «ОК». После задания всех граничных условий в окне 3-х мерного отображения мы должны видеть рассматриваемую модель с входной и выходной поверхностями, периодическими поверхностями и т.д.

Теперь переходим к настройке решателя, в дереве проекта открываем "Solver Control" и видим следующее окно, изображённое на рис. 1.19. Меняем выделенные на рисунке значения в зависимости от решаемой задачи и требуемой точности сходимости.

- Max. Iterations – количество итераций по истечению которых расчет закончится;

- Residual Target – значение среднеквадратичных невязок, по достижению которых расчет завершится.

Для расчётов лабораторных работ рекомендуется использовать в качестве максимального числа итераций 1000, а значение невязок 10^{-4} .

В появившемся окне "Define Run" настраиваем количество ядер, которые будут использоваться во время расчета, и рабочую директорию, в которую будут сохраняться результаты расчёта рис. 1.21. Далее нажимаем "Start Run" и наблюдаем сам расчёт.

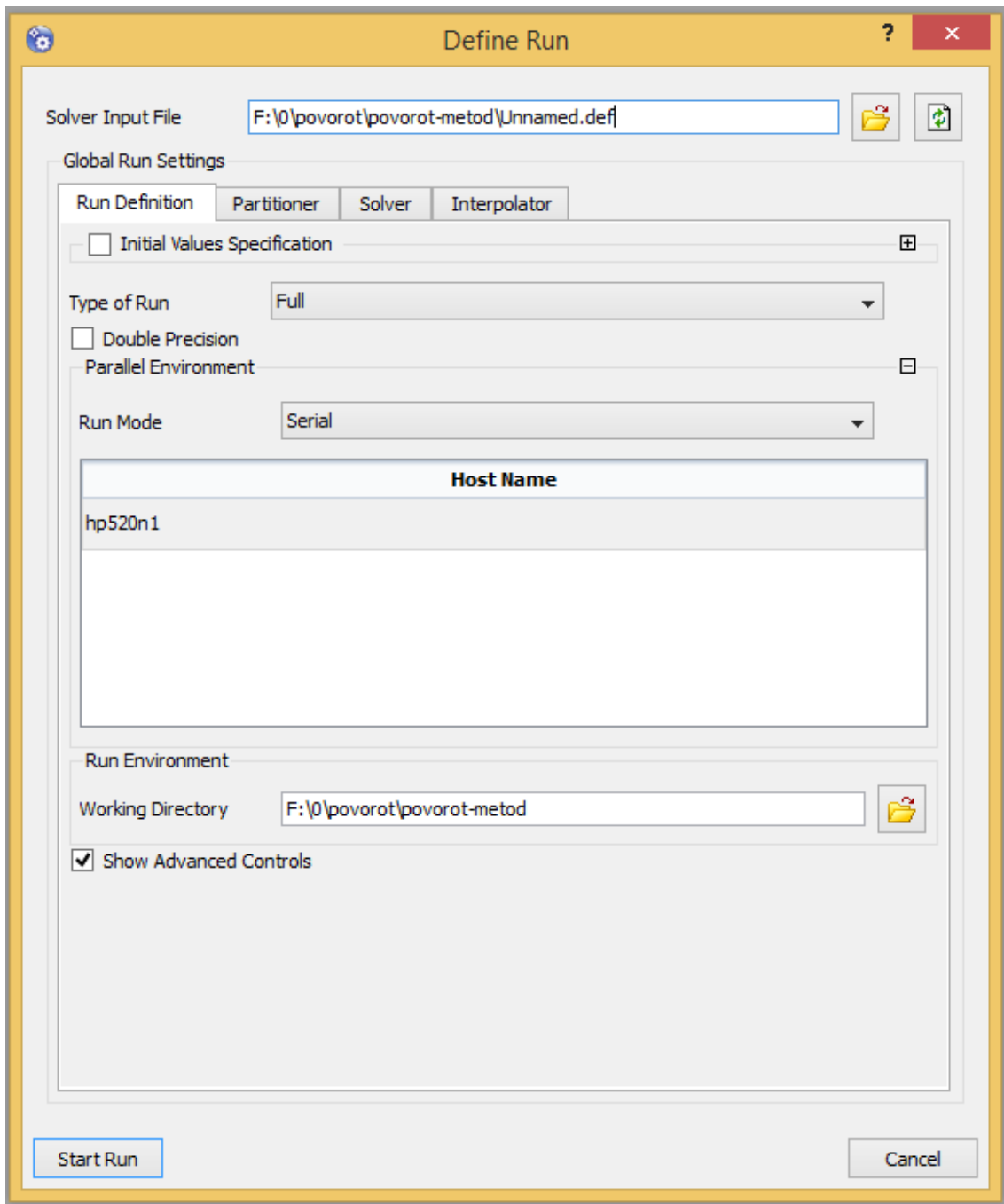


Рис.1.21. Настройка параметров решателя ANSYS

1.6. Отображение результатов

После завершения расчётов будет предложено закрыть результаты или отобразить их сразу. Для отображения результатов используется пакет CFD-Post (файл с расширением .res). Для каждого из заданий на лабораторную работу имеется свой набор данных, который необходимо предоставить в отчёте. В качестве примера рассмотрим получение в постпроцессоре набора следующих данных:
1) векторное поле скоростей потока; 2) поле полного давления.

Так же для визуальной информации можно реализовать 3-х мерный поток, чтобы визуально понять его поведение.

Пример построения векторного поля скорости.

Для начала необходимо создать поверхность, на которой будет отображено поле скоростей (рис. 1.22).

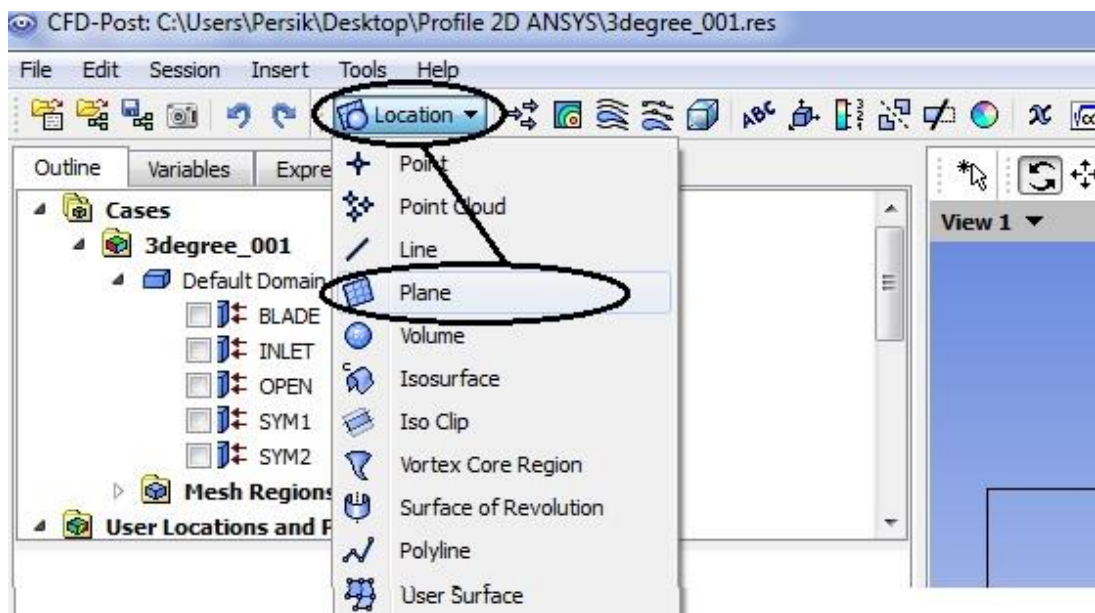


Рис. 1.22. Задание параметров области отображения результатов

Затем необходимо настроить поверхность, выбрав плоскость отображения, как показано на рис. 1.23.

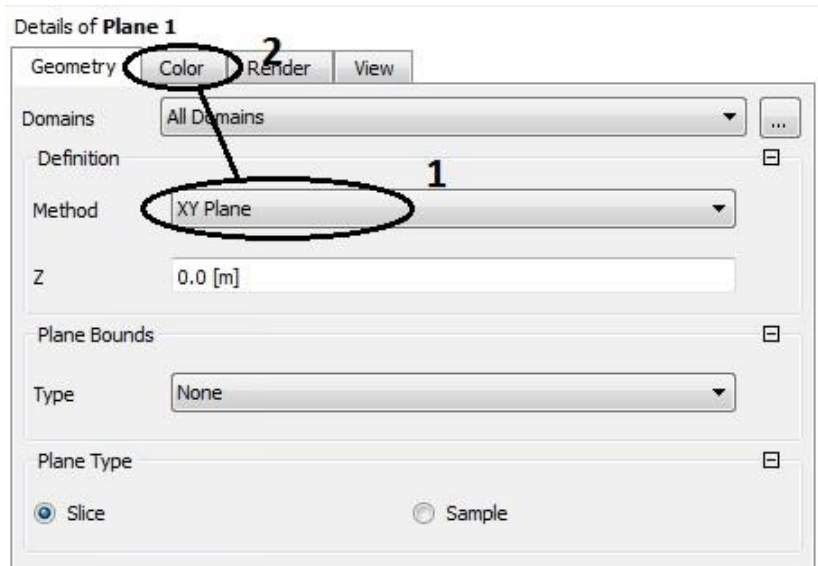


Рис. 1.23. Настройка плоскости отображения

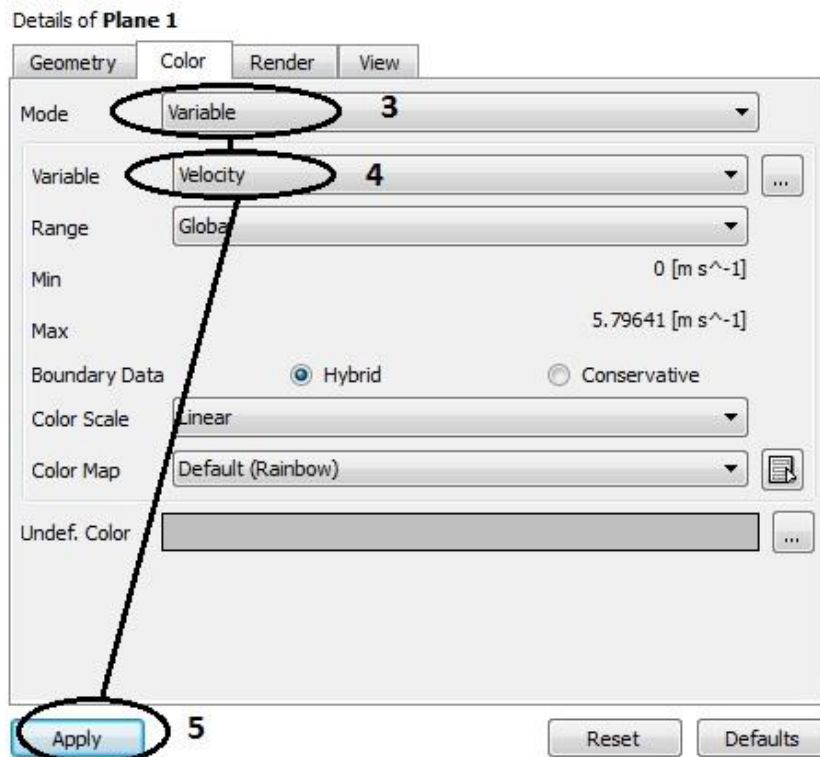


Рис. 1.24. Настройка параметров в плоскости отображения

После этого можно выбирать различные значения, которые рассчитываются по умолчанию. Выбрав необходимый параметр, нужно применить изменения, как показано на рис.1.24. После этого

для параметра скорости можно поверх плана наложить векторы скорости. Сделать это можно следующим образом: выбрать в верхнем меню иконку с векторами. Во вкладке «Geometry» нужно выбрать план, на котором эти векторы будут отображаться, тип расположения и количество векторов, как показано в примере на рис.1.25. После этого во вкладке «Color» рекомендуется выбрать постоянный цвет, как показано на рис. 1.26, и применить изменения.

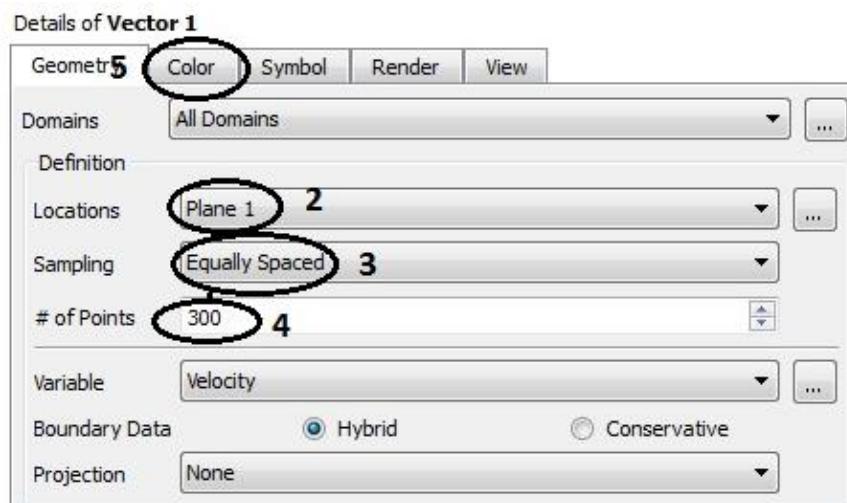


Рис. 1.25. Параметры расчетного векторного поля скоростей

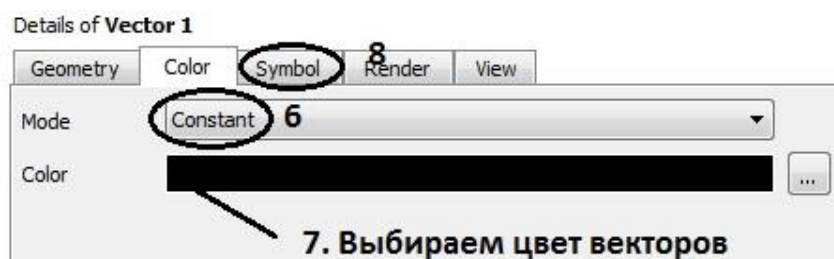


Рис. 1.26. Задание цвета векторного поля

Для анимации течения необходимо выбрать иконку «Stream line» и поверхность, которая будет начальной для потока (рис. 1.27). Затем войти в меню анимации «Animation». Из предложенных

вариантов необходимо выбрать только что созданную модель анимации «Stream line» (по умолчанию) и воспроизвести её. В данном меню так же можно варьировать скорость проигрывания анимации течения, количество линий тока можно регулировать в разделе «Stream line».

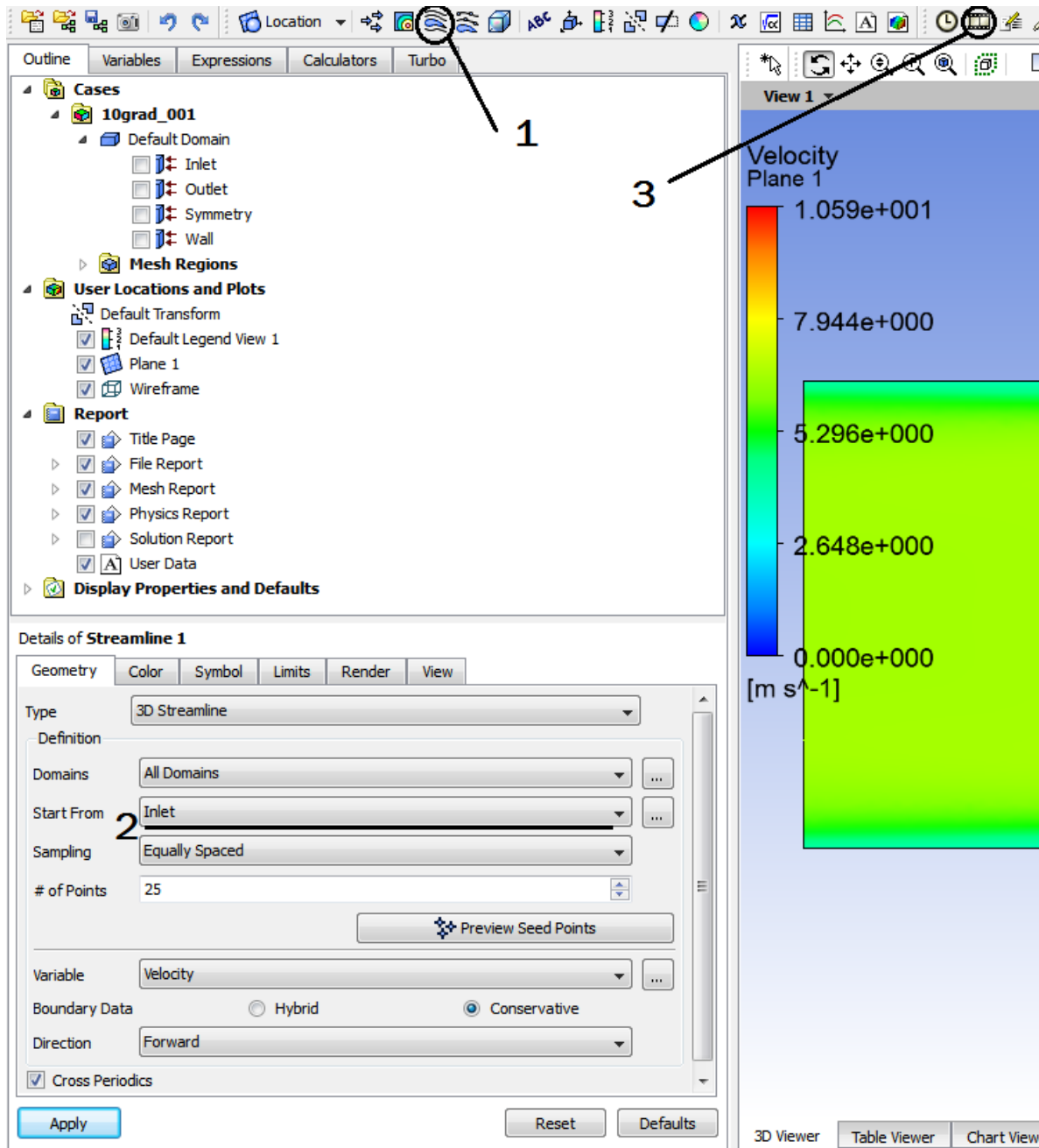


Рис.1.27. Задание параметров для анимации расчетного течения

2. РАСЧЁТ ТЕЧЕНИЯ В ТРУБЕ

2.1. Общие сведения о течении жидкости в трубе

Режим течения жидкости (газа) влияет на выбор эмпирических формул для расчета потерь, задание граничных условий и построение сетки при использовании программного комплекса Ansys. Режим движения зависит от числа Рейнольдса, выражающего соотношение сил инерции и сил вязкости (внутреннего трения) в потоке:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}, \quad (2.1)$$

где V – скорость, м/с, D – гидравлический диаметр, м, ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с. Для воды $\nu = 10^{-6}$, м²/с.

Для каждого конкретного гидравлического тракта существует некоторый диапазон критических значений числа Re , при которых происходит переход от ламинарного режима течения к турбулентному. Критическое значение числа Re для круглой трубы составляет примерно 2300, после этого режим течения перестает быть ламинарным и происходит переход к турбулентному течению.

При движении вязкой жидкости слой, прилегающий к стенке трубы, прилипает к ней. В этой области, называемой пограничным слоем, устанавливается переменная по сечению скорость, возрастающая от нуля вблизи стенки, до скорости невозмущенного потока (рис. 2.1). Другие критерии динамического подобия приведены в таблице 1.1, в которой ℓ_0 – характерный размер; V_0 – характерная скорость; p_0 – характерное давление; T_0 – масштаб времени; ν – кинематический коэффициент вязкости.

Основные критерии динамического подобия

Критерий	Расчетная формула	Физический смысл критерия
Струхаля	$Sh = \frac{\ell_0}{v_0 T_0}$	Отношение сил инерции конвективного и локального ускорений (нестационарность процесса)
Фруда	$Fr = \frac{v_0^2}{g \ell_0}$	Отношение сил инерции к силам тяжести (потоки со свободной поверхностью и кавитационные течения)
Эйлера	$Eu = \frac{P_0}{\rho v_0^2}$	Отношение сил давления к силам инерции (для моделирования кавитационных явлений)
Рейнольдса	$Re = \frac{v_0 \ell_0}{\nu}$	Отношение сил инерции к силам вязкости (для напорных течений реальной жидкости)

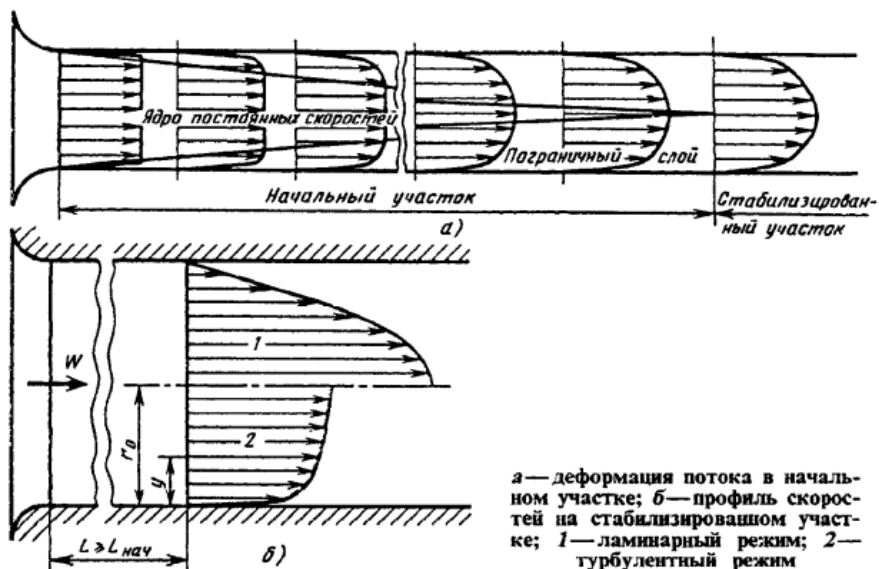


Рис.2.1. Распределение скорости по поперечному сечению трубы

Влияние числа Рейнольдса на потери местного сопротивления особенно проявляются при малых числах Рейнольдса, которым в трубопроводе без местного сопротивления соответствует ламинарное движение. При наличии местного сопротивления нарушение ламинарного режима течения происходит раньше.

Рекомендуется определить потери давления или напора по длине рассматриваемого трубопровода, используя формулы Дарси-Вейсбаха (2.2) для определения потерь напора и (2.3) для определения потерь давления

$$\Delta H = \xi \frac{V^2}{2g}, \quad (2.2)$$

где ΔH – потери напора в трубе на участке длиной L за счет гидравлического сопротивления, ξ – коэффициент потерь, V – скорость течения жидкости, g – ускорение свободного падения

$$\Delta p = \xi \rho \frac{V^2}{2g}, \quad (2.3)$$

где Δp – потери давления на участке трубы длиной L , ρ – плотность рассматриваемой жидкости.

Коэффициент потерь на гидравлическое сопротивление по длине при течении в круглой трубе с длиной L и диаметром D определяется по формуле:

$$\xi = \lambda \frac{L}{D}, \quad (2.4)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения. Подставляя (2.4) в (2.2) и (2.3) получим формулы Дарси-Вейсбаха для определения падения напора и давления при течении в трубе:

$$\Delta H = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}, \quad (2.5)$$

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D} \rho \frac{V^2}{2g}. \quad (2.6)$$

Если рассматривается труба некруглого поперечного сечения, то вместо диаметра D следует использовать гидравлический диаметр.

Коэффициент гидравлического трения при ламинарном течении в гладких трубах определяется по формуле

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (2.7)$$

Для турбулентного гидравлически гладкого течения для определения коэффициента λ используется формула Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}, \quad (2.8)$$

которая верна для чисел Рейнольдса, меняющихся от критического значения $Re_{кр}=2300$ до $Re=10^5$. Для гидравлически шероховатых труб можно использовать график Никурадзе или имеющиеся полуэмпирические формулы.

2.2. Варианты заданий

Для выполнения данной работы предлагаются задания, приведенные в таблице 1.2.

Т а б л и ц а 1.2

Диаметры трубы

№	1	2	3	4	5	6
D, мм	10	15	20	25	30	35

2.3. Выполнение расчёта

Моделью потока в данной работе будет цилиндрическое тело, которое построим в программе SW, как было описано в предыдущей главе. Создаётся эскиз окружности с диаметром по заданию. Затем эскиз окружности вытягиваем на длину равную 30 калибрам (1 калибр = 1 диаметру). Полученную модель потока жидкости в трубе теперь следует перевести в формат Parasolid (.X_t). Для этого сохраняем модель в другом формате (сохранить как...). Теперь полученная модель готова для работы в ANSYS. Закрываем SW и открываем сеточный генератор ICEM CFD, в котором создаем сетки обычную и призматическую.

Для данной модели при расчетах необходимо описать 3 поверхности: входную (Inlet), выходную (Outlet) и стенку (Wall). После этого модель разбивается на ячейки (см. раздел 1.4). На рис. 2.2-2.3 показаны объемная сетка и плоская с призматическими слоями.

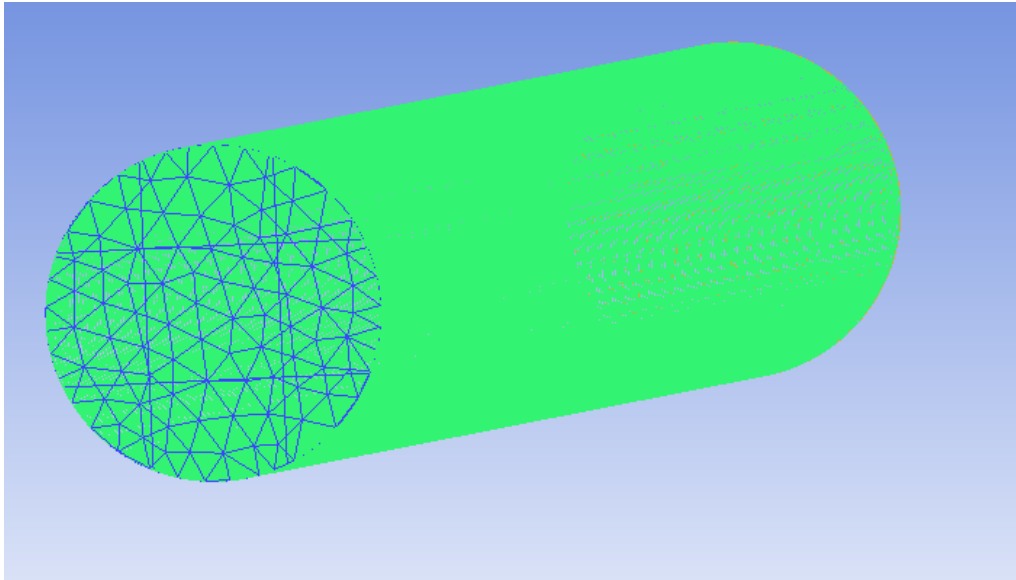


Рис.2.2. Сгенерированная объёмная сетка

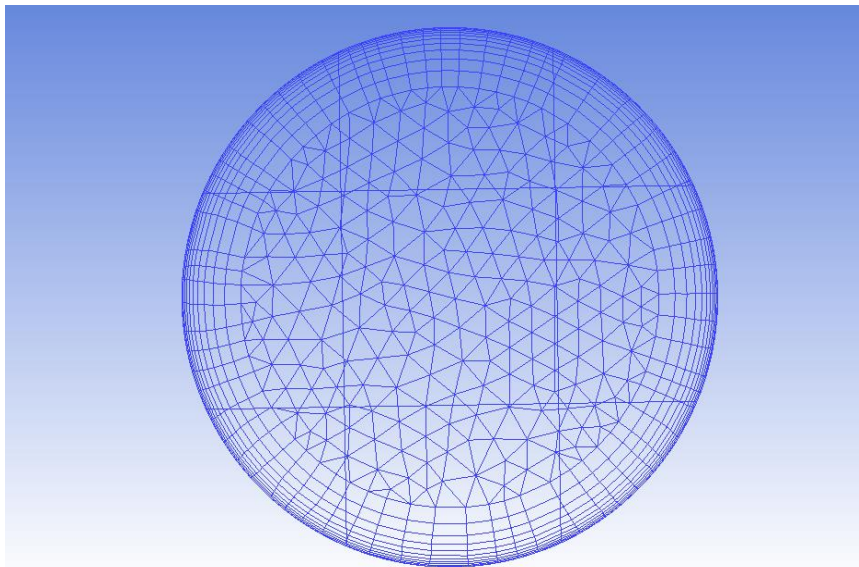


Рис. 2.3. Сетка с призматическими слоями

После создания призматических слоев нужно сохранить проект и экспортировать сетку. Для этого сначала нужно выбрать решатель: во вкладке "Output" в окне "Select solver" выбрать решатель "ANSYS CFX". Затем нажать "Ok", и далее кнопку "Write input". В появившемся окне нажать "Done".

Далее необходимо следовать последовательности описанной в разделе 1.4. Так как модель является простой, то никаких дополнительных условий не накладывается. После задания всех граничных условий, можно запустить проект на расчёт.

Для отчёта о выполненной работе потребуется следующий набор рисунков: рисунок полного давления (Total Pressure), поле скоростей и векторов (Velocity). В выводах следует описать и объяснить полученные результаты, ссылаясь на рисунки.

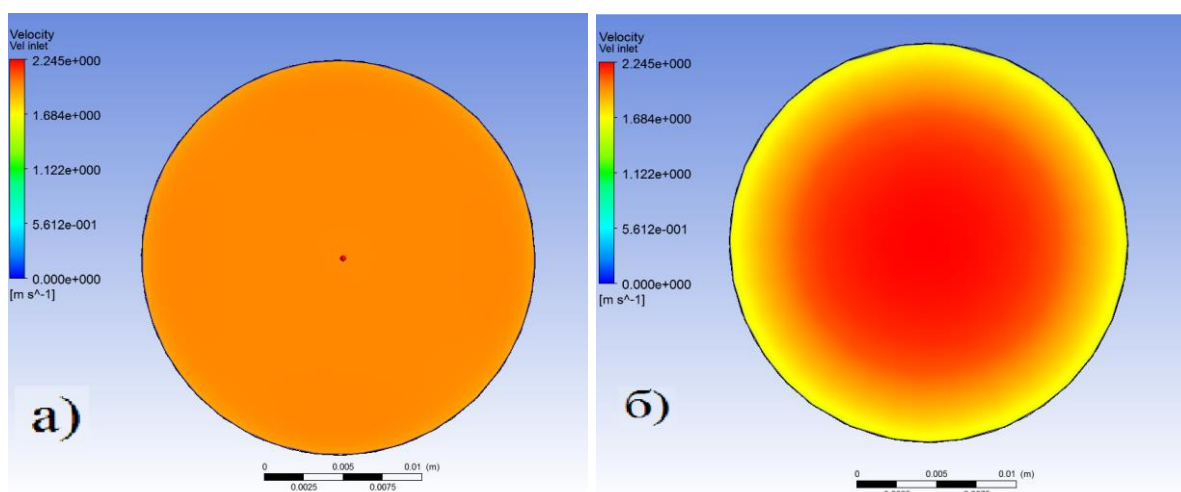


Рис. 2.4. Распределение скорости во входном (а) и выходном (б) сечениях трубы

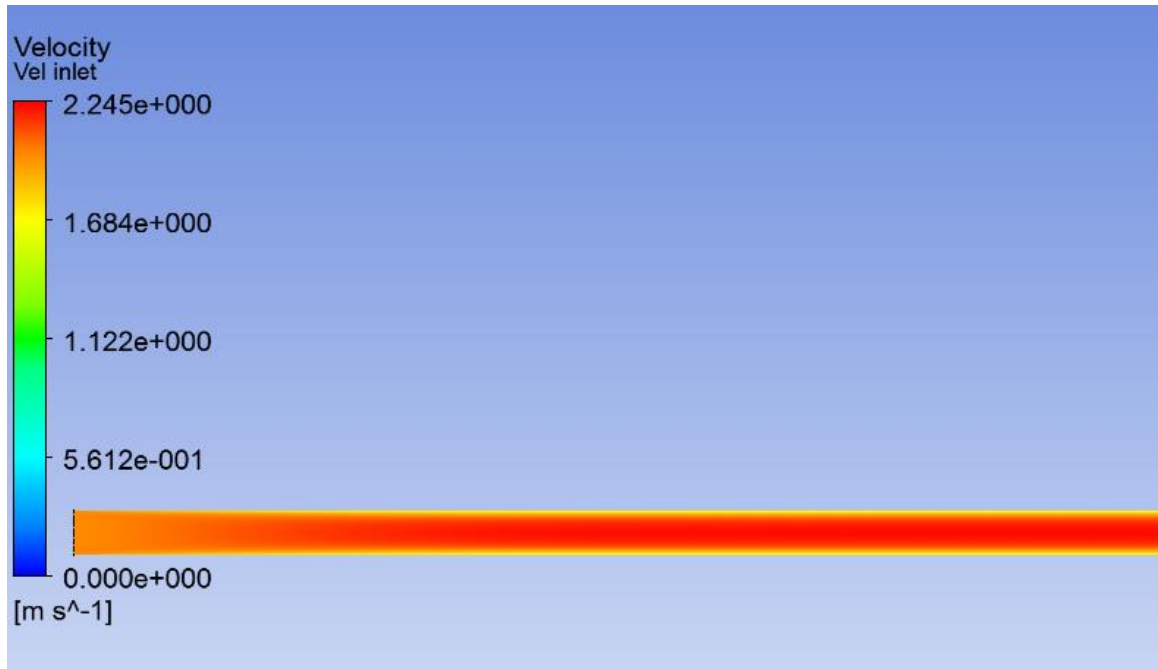


Рис. 2.5. Установление скорости потока жидкости в трубе

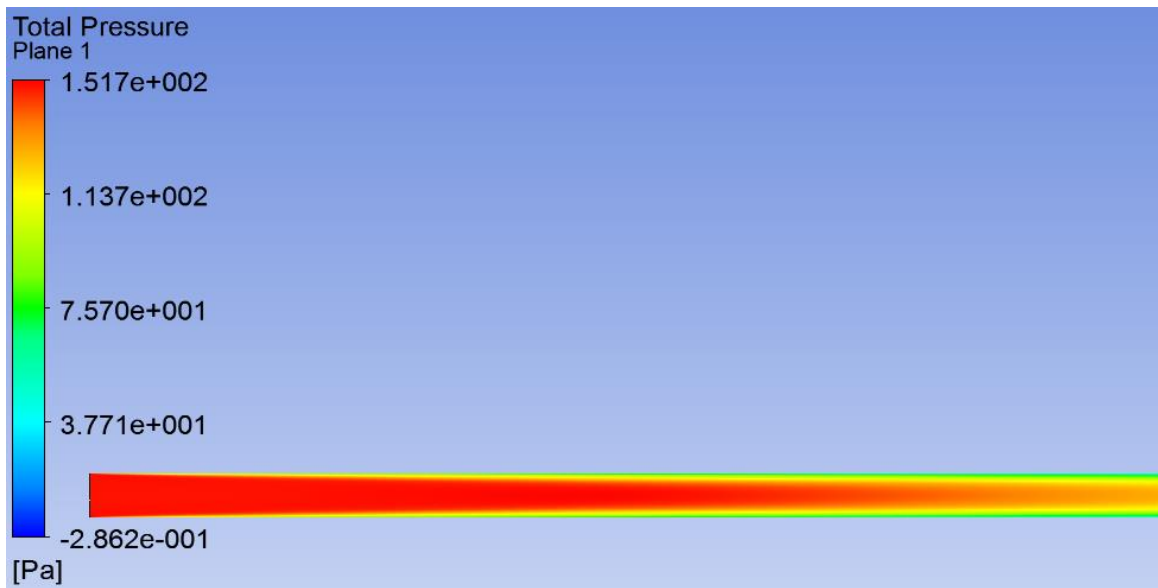


Рис. 2.6. Распределение полного давления в трубе

3. РАСЧЁТ ТЕЧЕНИЯ В КОЛЕНЕ

3.1. Общие сведения о течении жидкости в колене

Поток жидкости, следующий из одного канала в другой не может сразу же следовать контуру переходного сечения, поэтому в месте истечения наблюдается обратное течение жидкости.

Давление в изогнутом канале уменьшается от внешней к внутренней поверхности в направлении от центра изгиба. Градиент давления влияет на жидкость центробежным ускорением. Скорость потока около стенки (поверхностный слой) ниже, чем в центре канала. Из-за более высокой скорости частицы жидкости в центре канала подвергаются большему воздействию центробежных сил, чем медленно текущие частицы возле стенок. Из-за инерционности ядро потока отклоняется к внешней стенке и с учетом непрерывности течения поток может течь обратно через пограничный слой.

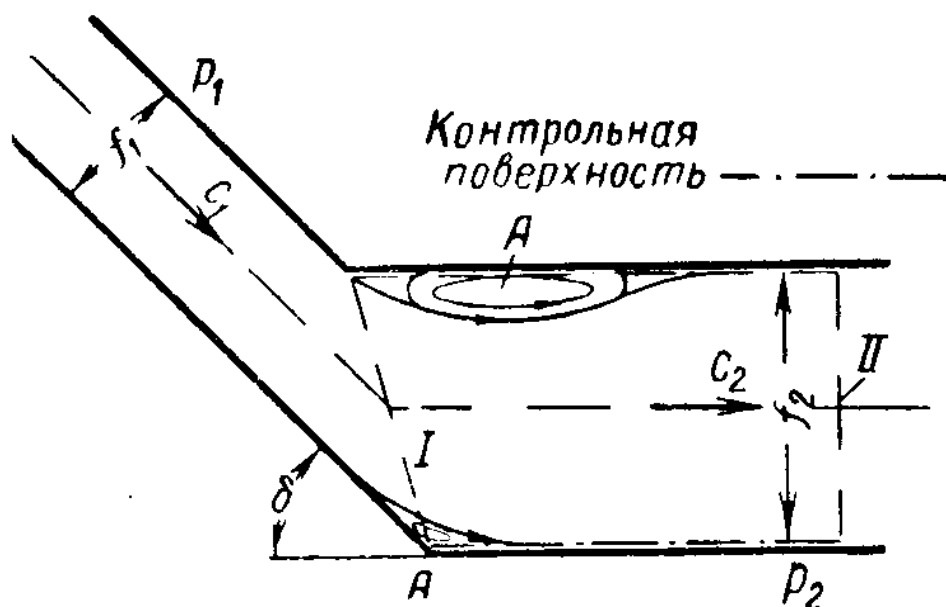


Рис.3.1. Поворот потока жидкости в колене

В результате искривления потока на вогнутой стороне внутренней поверхности трубы давление больше, чем на выпуклой. В связи с этим жидкость в поперечных сечениях движется с различной скоростью, что способствует отрыву пограничного слоя от стенок.

Эмпирически были получены различные величины коэффициента местного сопротивления $\xi_{\text{кол}}$, который зависит от угла поворота θ , радиуса поворота R , формы поперечного сечения и приводится в справочниках. Для круглого сечения трубы при $\theta = 90^\circ$, как показано на рис. 3.2, коэффициент сопротивления можно определить по формуле 3.1:

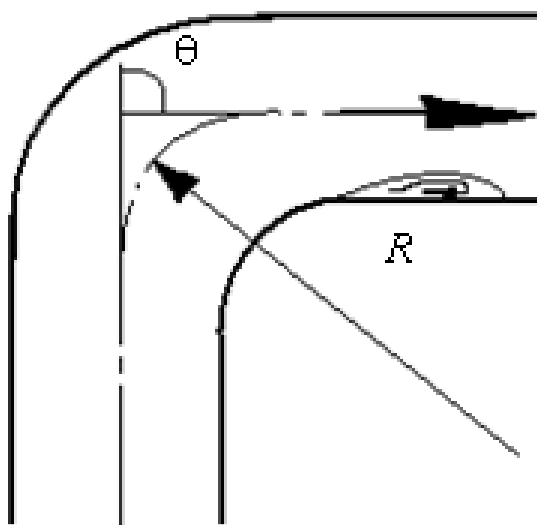


Рис. 3.2. Поворот жидкости в колене круглого сечения

$$\xi_{\text{кол}} = 0,05 + 0,2 \frac{d}{R} \quad (3.1)$$

3.2. Варианты заданий

Т а б л и ц а 3.1

Варианты заданий

Вариант	Диаметр в мм	Диаметр в дюймах
1	10	3/8"
2	15	1/2"
3	20	3/4"
4	25	1"
5	32	1 1/4"
6	40	1 1/2"
7	50	2"

Скорость течения жидкости в трубе принимаем равной 2 м/с.

3.3. Выполнение расчета

Последовательность выполнения работы похожа на предыдущую: для начала необходимо создать цилиндрическую поверхность течения жидкости в трубе (из эскиза окружности).

Далее необходимо нарисовать траекторию трубы. Для этого создаём эскиз в перпендикулярной плоскости для уже созданного эскиза. Из центра окружности перпендикулярно создать 2 линии на нужные расстояния (с помощью «автоматического нанесения размеров») и с помощью функции «скруглить» изгибаем траекторию под нужным радиусом равном диаметру трубы. В итоге получаем вид, показанный на рис. 3.3. Рекомендуемый размер длины трубы до поворота 6 - 7 калибров, после поворота – 20 калибров.

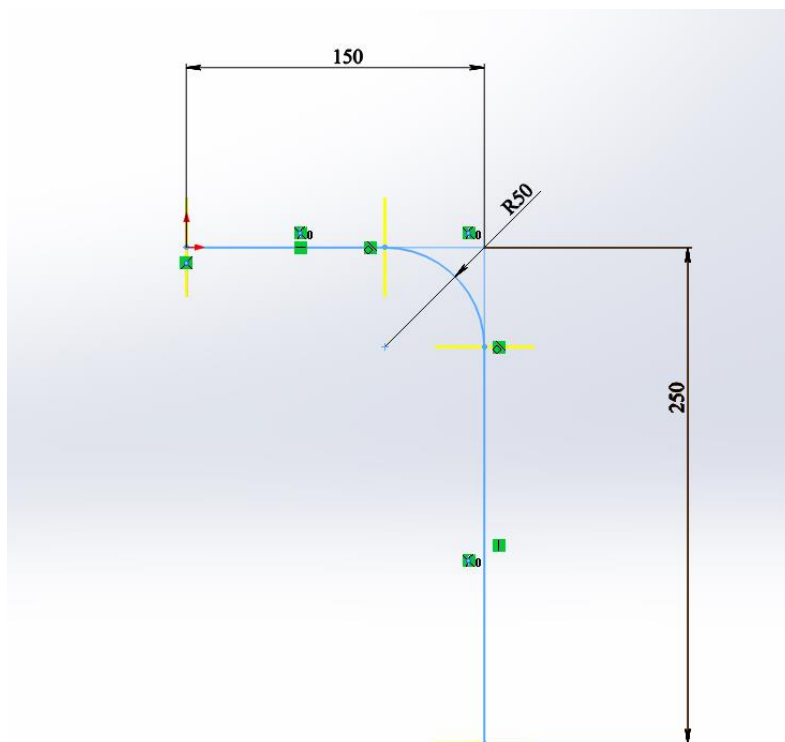


Рис.3.3. Создание осевой линии трубы

После этого нужно создать полную модель трубы - в меню «Элементы» выбрать «Бобышка/основание по траектории» и выбрать созданные ранее эскизы, как показано на рис.3.4.

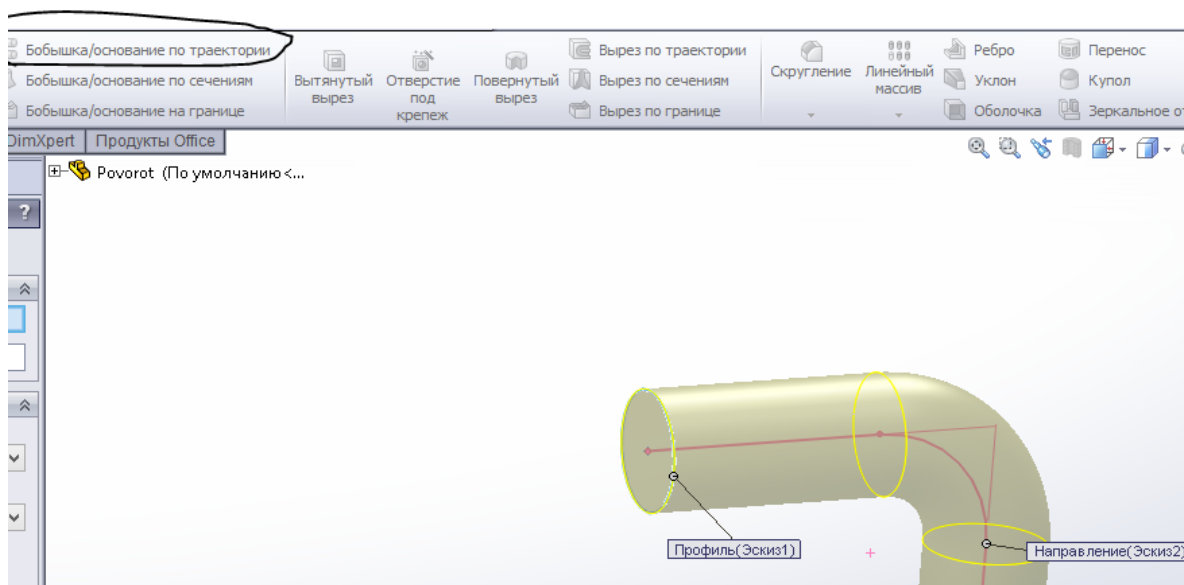


Рис. 3.4. Создание геометрической модели трубы

Полученную модель необходимо импортировать в сеточный генератор (рис.3.5).

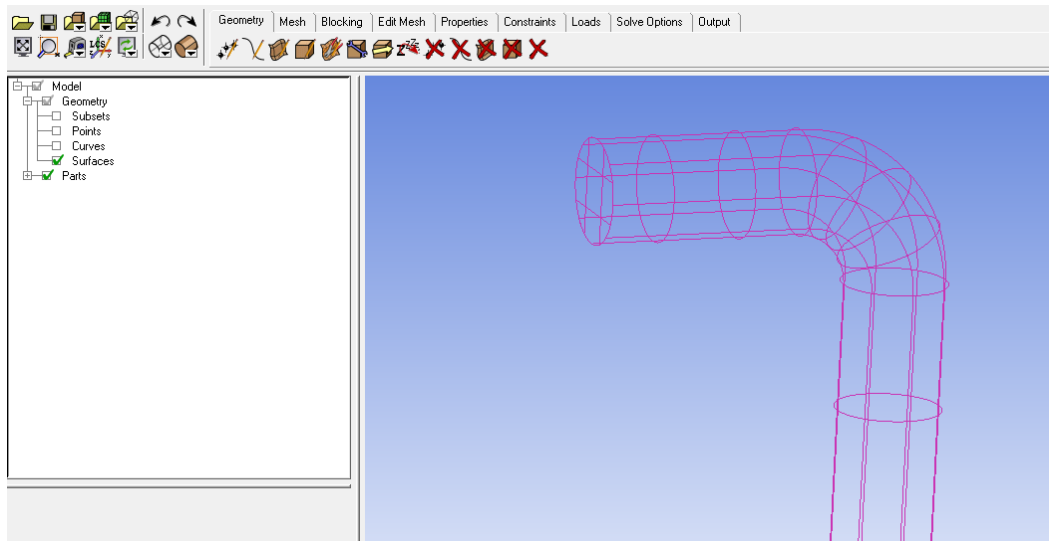


Рис. 3.5. Модель трубы в сеточном генераторе

Создаём поверхности *Inlet*, *Outlet* как показано на рис.3.6-3.7, а оставшуюся поверхность переименуем в «Wall».

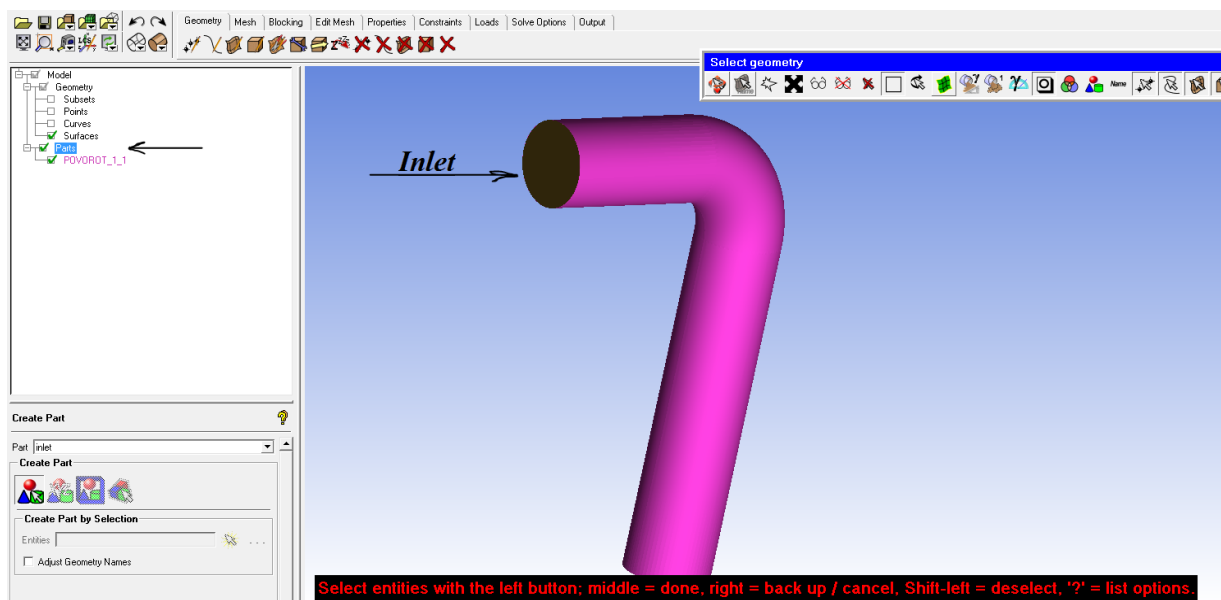


Рис. 3.6. Задание входной поверхности «Inlet»

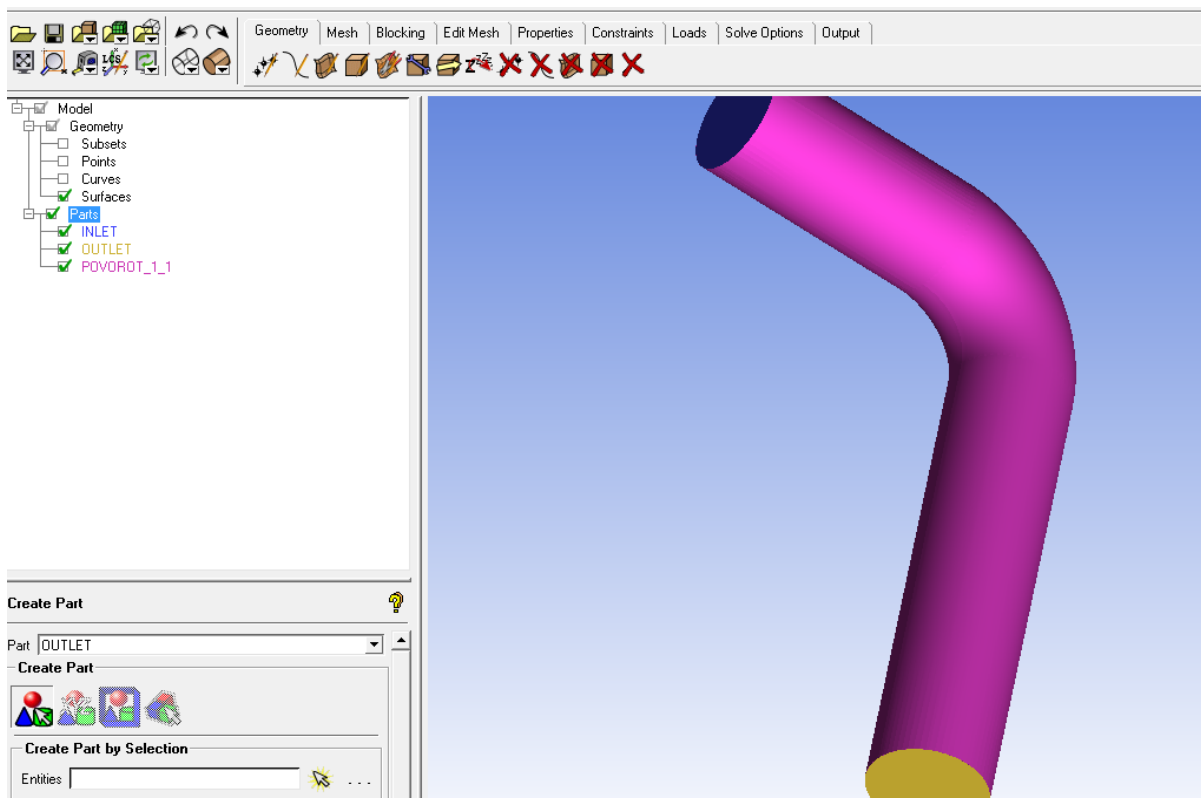


Рис. 3.7. Задание выходной поверхности «Outlet»

После этого генерируем сетки объёмных и призматических ячеек. От прошлой работы данный этап не отличается. После этого, переносим полученную модель в решатель и задаем граничные условия, которые так же одинаковы для этих двух работ. При правильном задании условий на поверхностях должна быть модель, похожая на представленную на рис. 3.7.

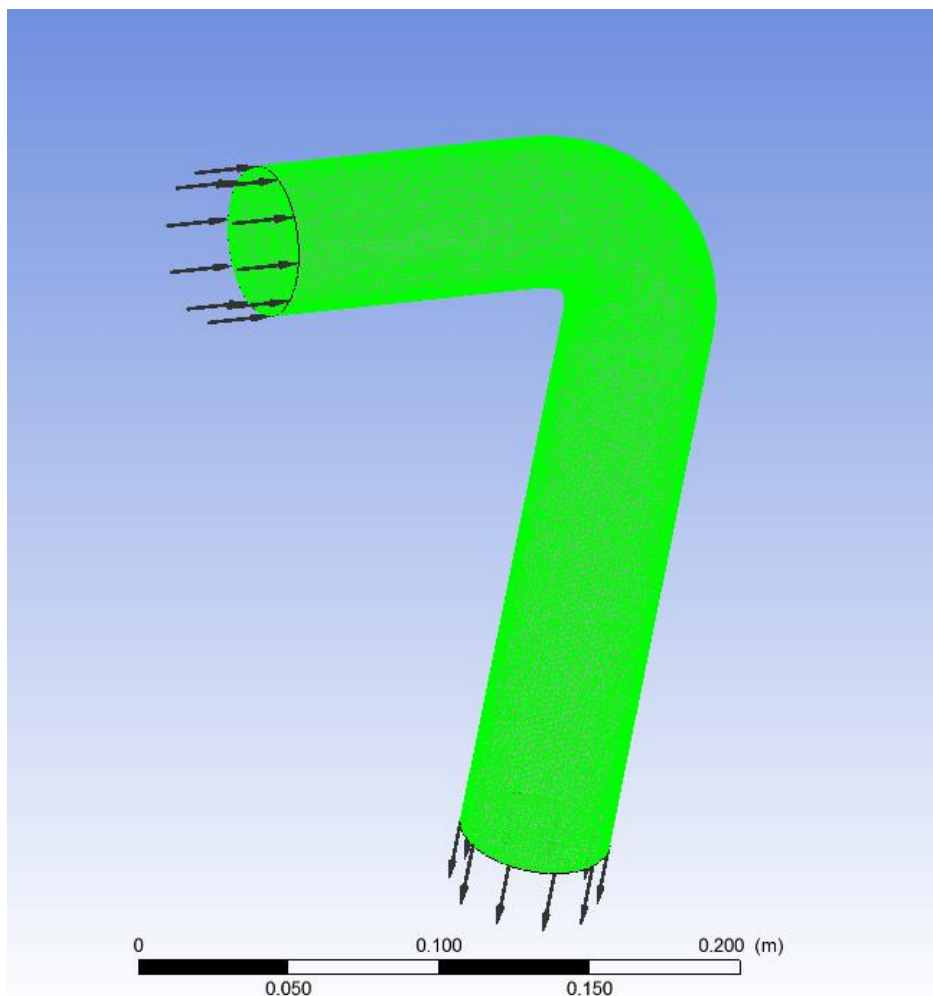


Рис. 3.8. Модель для расчета течения жидкости в колене

Далее запускаем задачу на счёт и делаем необходимые рисунки для отчёта: поля полного давления и скорости с векторами, так же необходимо в увеличенном масштабе показать зону отрыва потока сразу после поворота.

Полученные результаты (пример на рис. 3.9) описать и обосновать.

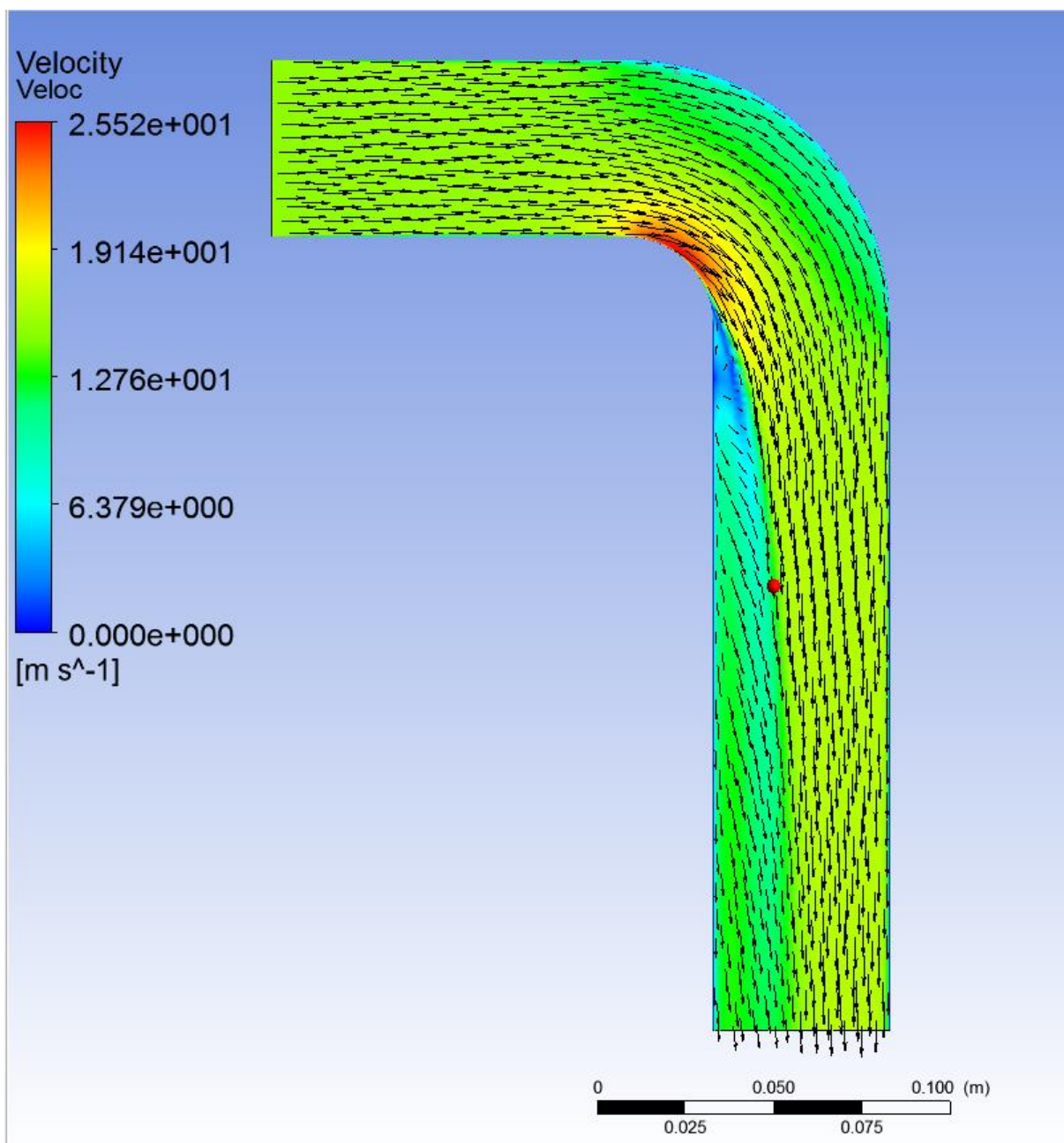


Рис. 3.9. Поле скорости в изогнутой трубе

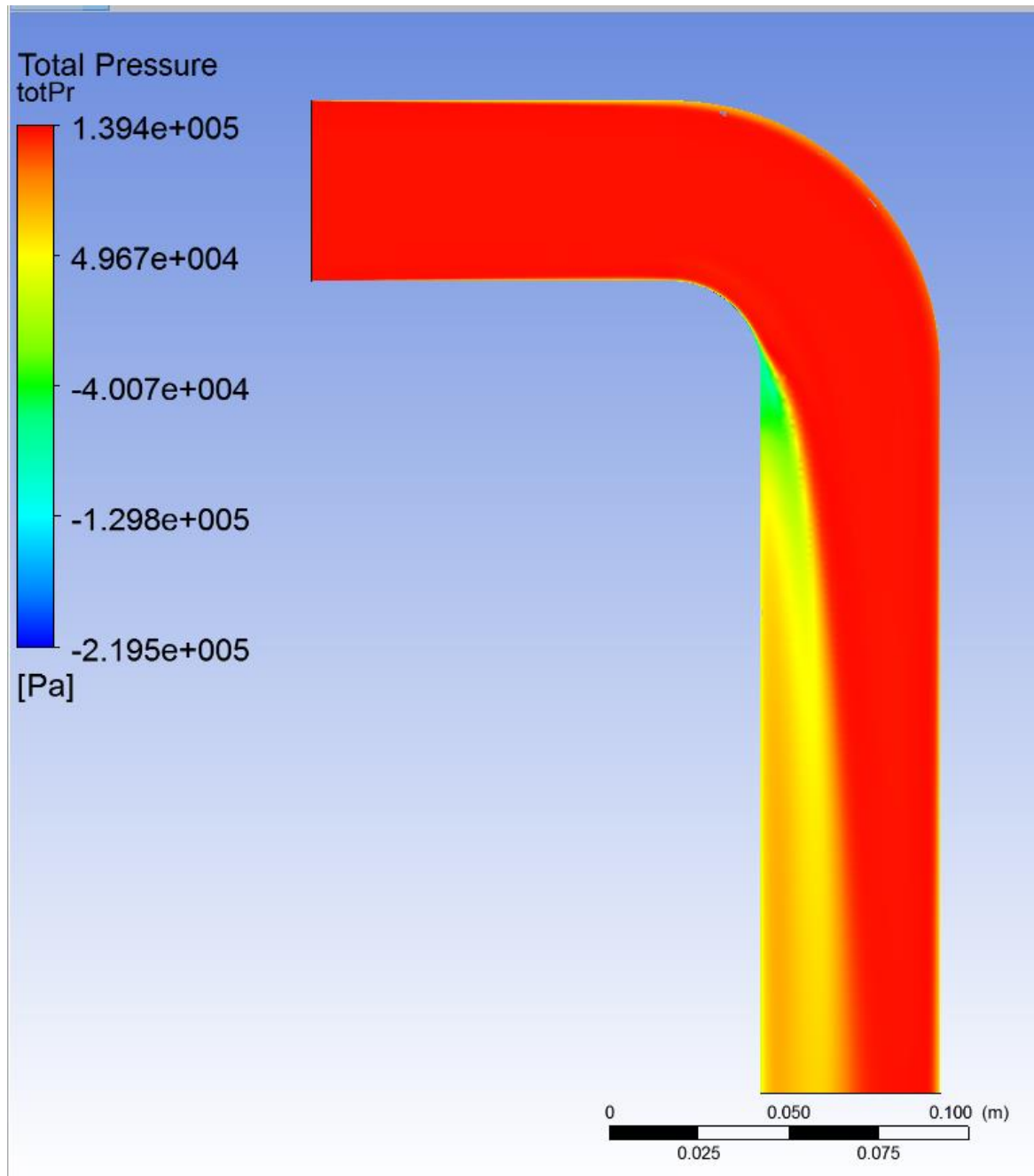


Рис. 3.10. Поле полного давления в изогнутой трубе

4. РАСЧЁТ ТЕЧЕНИЯ В ДИФфуЗОРЕ

4.1. Общие сведения о течении в расширяющемся канале

Поток жидкости, следующий из одного канала в другой не может сразу же следовать контуру переходного канала, поэтому в месте истечения наблюдаются области возвратного течения жидкости. Подобные области встречаются во многих гидромашинах, например, в гидротурбинах в отсасывающей трубе.

4.2. Варианты заданий

Для выполнения данной работы необходимы следующие значения: высота входной области – 25 мм, длина первого равномерного участка 40-50 мм (1,5-2 высоты), длина второго равномерного участка 125-175 мм (5-7 высот входного участка), высота выходной области – 50 мм. Угол перехода из первой равномерной области во вторую – по заданию (табл. 4.1).

Т а б л и ц а 4.1

Углы раскрытия диффузора

1	2	3	4	5	6
35°	40°	45°	55°	65°	75°

4.3. Выполнение расчета

Как и в предыдущих работах, для начала необходимо создать модель области течения в диффузоре. Для этого из центра координат проводим осевую линию, относительно которой будем зеркально отображать стенки диффузора. Затем рисуем сам диффузор. В зависимости от задания необходимо получить следующее: небольшой

начальный участок (1.5-2 высоты входной области), затем расширение под заданным углом до размера, равного двум начальным высотам и зону для успокоения потока (5-7 высот), как показано на рис.4.1. Данный эскиз вытягивается на длину 10мм.

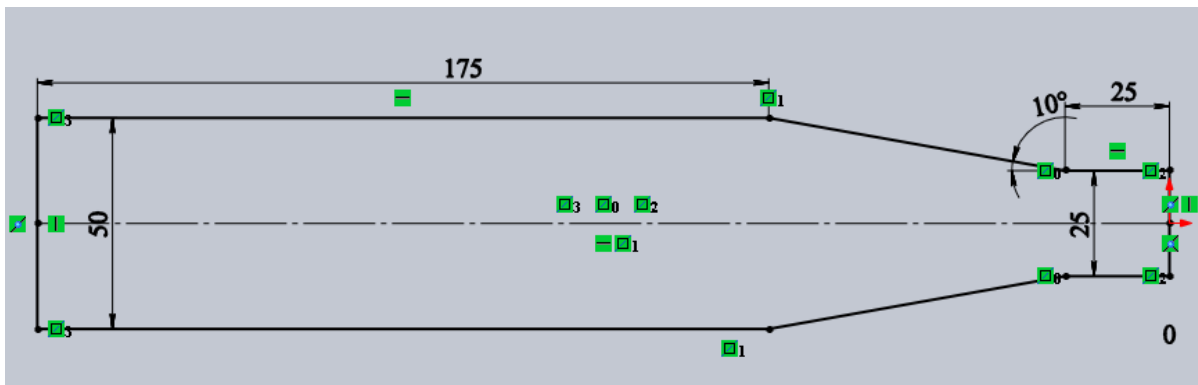


Рис. 4.1. Эскиз расчётной области

После этого в сеточном генераторе определяем поверхности: входная, выходная, стенка и симметрия. Симметричными поверхностями в данной работе являются поверхности, которые вытягивались на этапе эскиза.

Затем необходимо в сеточном генераторе аналогично предыдущим работам создать сетку с объёмными тетраэдральными (Max element = 1.75) и призматическими ячейками по рекомендациям из соответствующей главы в разделе 1. В результате должны получить сетку, подобную представленной на рис. 4.2.

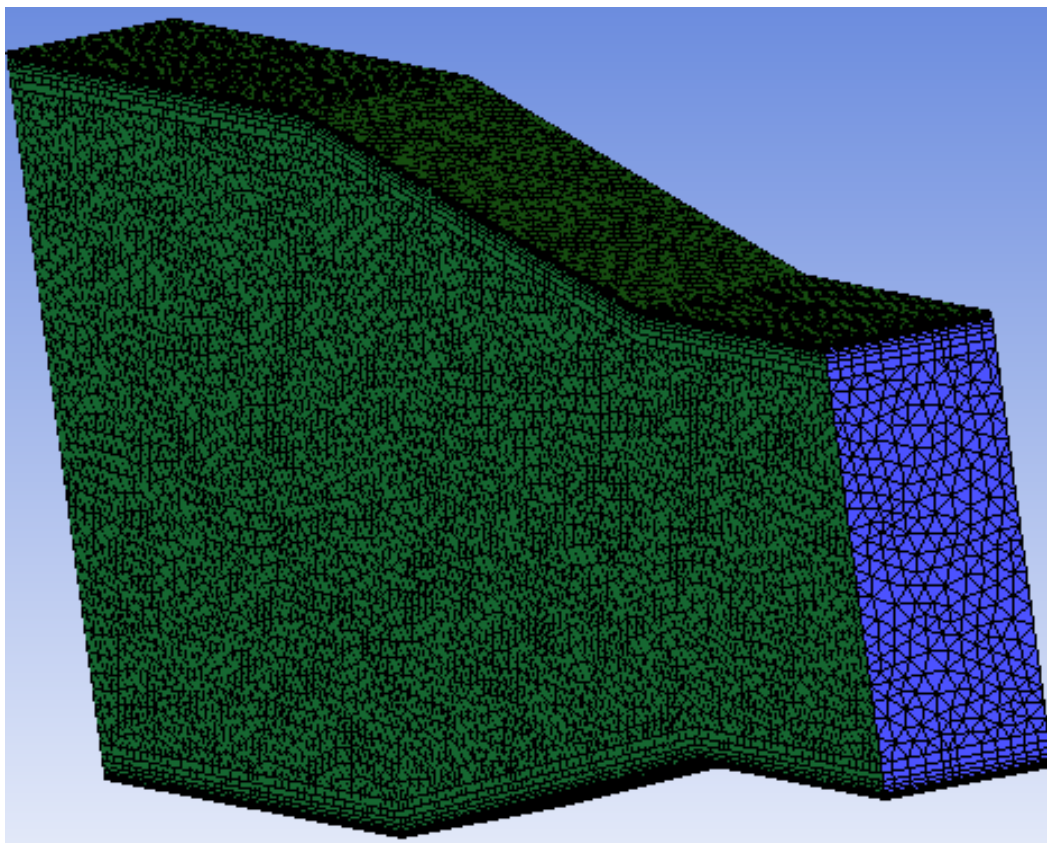


Рис. 4.2. Сетка для расчета течения в диффузоре

После этого в пре-процессоре CFX-Pre, загружаем полученную сетку и задаём необходимые граничные условия на соответствующих гранях и поверхностях. Во входной области в качестве входного параметра задаем скорость равную 2 м/с, остальные параметры, как и в предыдущих работах. После задания всех данных, условий и параметров запускаем задачу на расчёт.

В отчёте о проделанной работе необходимо представить поле полного давления по всей длине диффузорного участка, поле скоростей с векторами, в более крупном масштабе показать области обратного течения. Полученные результаты описать и обосновать.

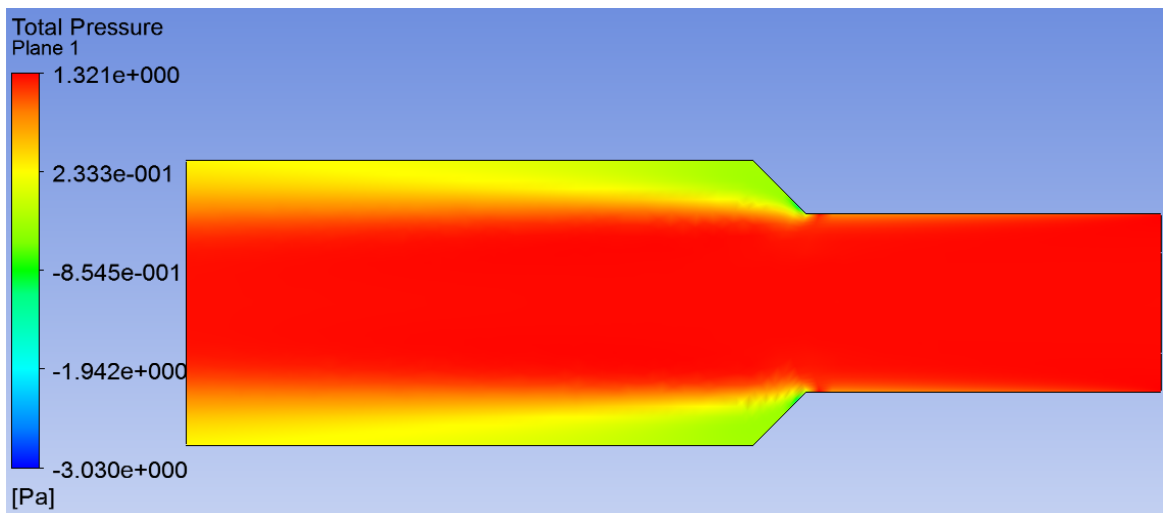


Рис. 4.3. Распределение давления в диффузоре

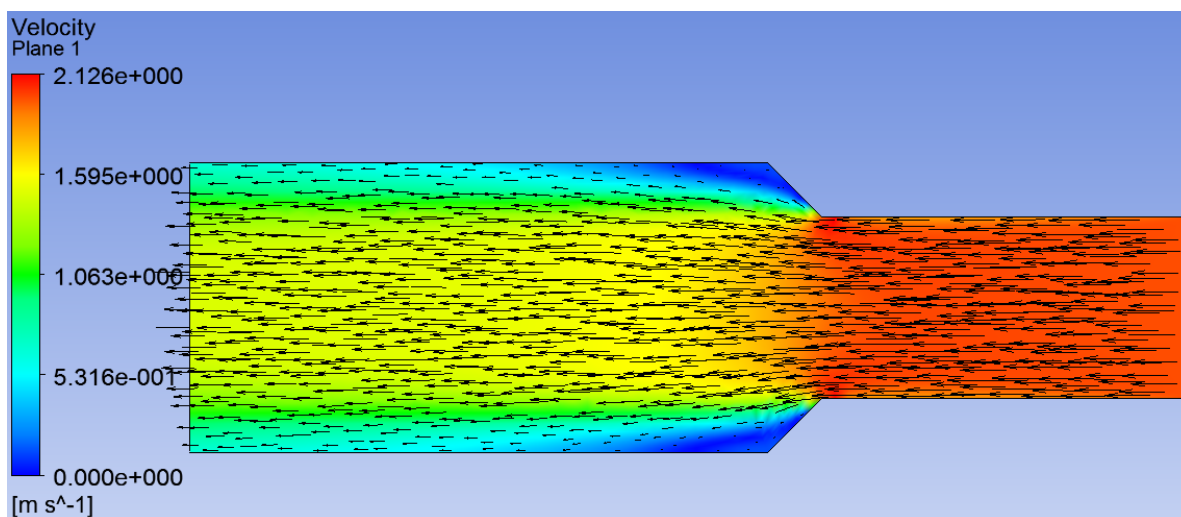


Рис. 4.4. Распределение скорости в диффузоре

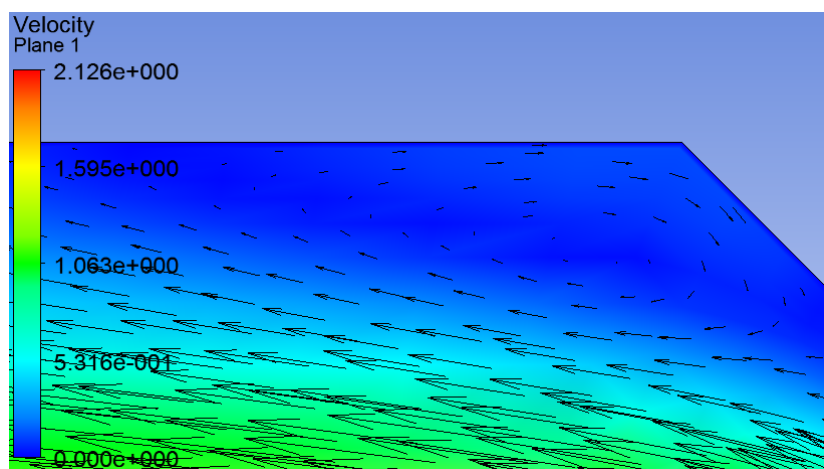


Рис. 4.5. Область обратного течения в диффузоре

5. РАСЧЁТ ТЕЧЕНИЯ В КОНФУЗОРЕ

5.1. Общие сведения о течении в конфузоре

Данная лабораторная работа является противоположной по смыслу предыдущей: поток жидкости из более широкого канала втекает в узкий.

5.2. Варианты заданий

Варианты для данной работы аналогичны предыдущей. Для выполнения данной работы необходимы следующие значения: высота выходной области – 25 мм, длина первого равномерного участка 40-50 мм (1,5-2 высоты), длина второго равномерного участка 125-175 мм (5-7 высот входного участка), высота входной области – 50 мм. Угол перехода из первой равномерной области во вторую – по заданию (табл. 5.1).

Т а б л и ц а 5.1

Углы конфузора

1	2	3	4	5	6
35°	40°	45°	55°	65°	75°

5.3. Выполнение расчёта

Если предыдущая лабораторная работа была выполнена и при этом остались файлы пре-процессора (CFX-Pre с расширением «.cfx»), то задача выполнения расчётов значительно упрощается. На этапе задания граничных условий нужно переставить местами входную и выходную области (Inlet и Outlet) и произвести запуск решателя.

В отчёте о проделанной работе необходимо представить поля полного давления и скоростей с векторами. Полученные результаты описать и обосновать.

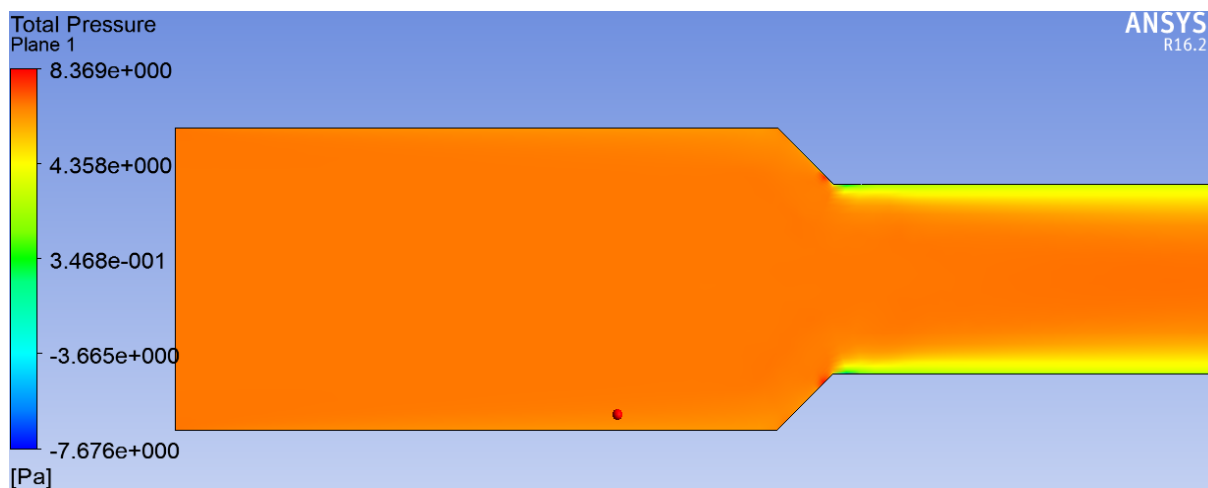


Рис. 5.1. Значение полного давления в конфузоре

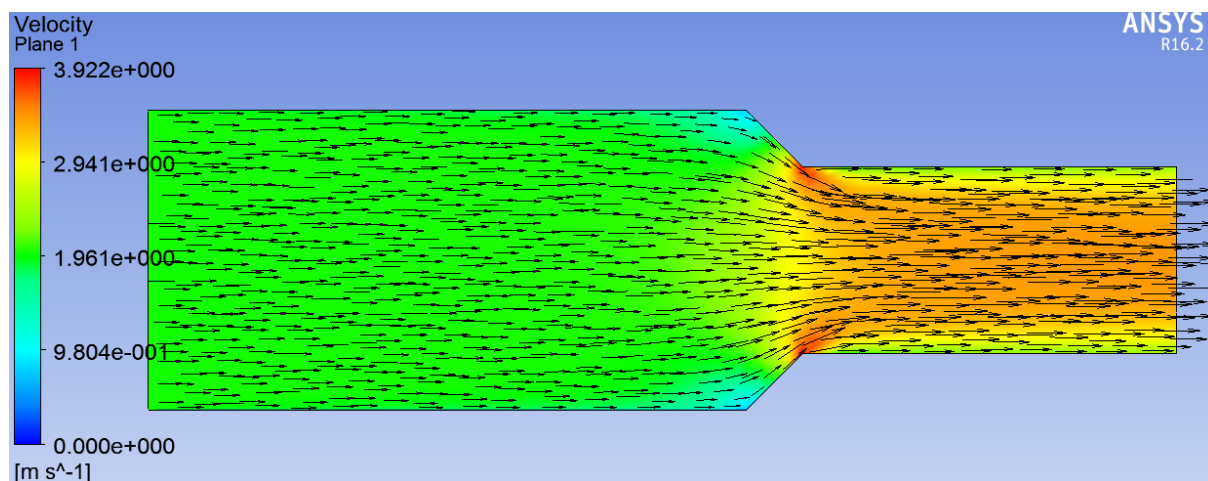


Рис. 5.2. Распределение скорости в конфузоре

6. ТЕЧЕНИЕ ВО ВНЕЗАПНО РАСШИРЯЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ

6.1. Общие сведения о течении при внезапном расширении

При внезапном расширении сечения трубы образуется струя, отделенная от остальной среды поверхностью раздела, которая распадается, а затем свертывается в вихри вблизи стенки и по периферии канала (рис. 7.1). В этой области происходят основные изменения параметров течения.

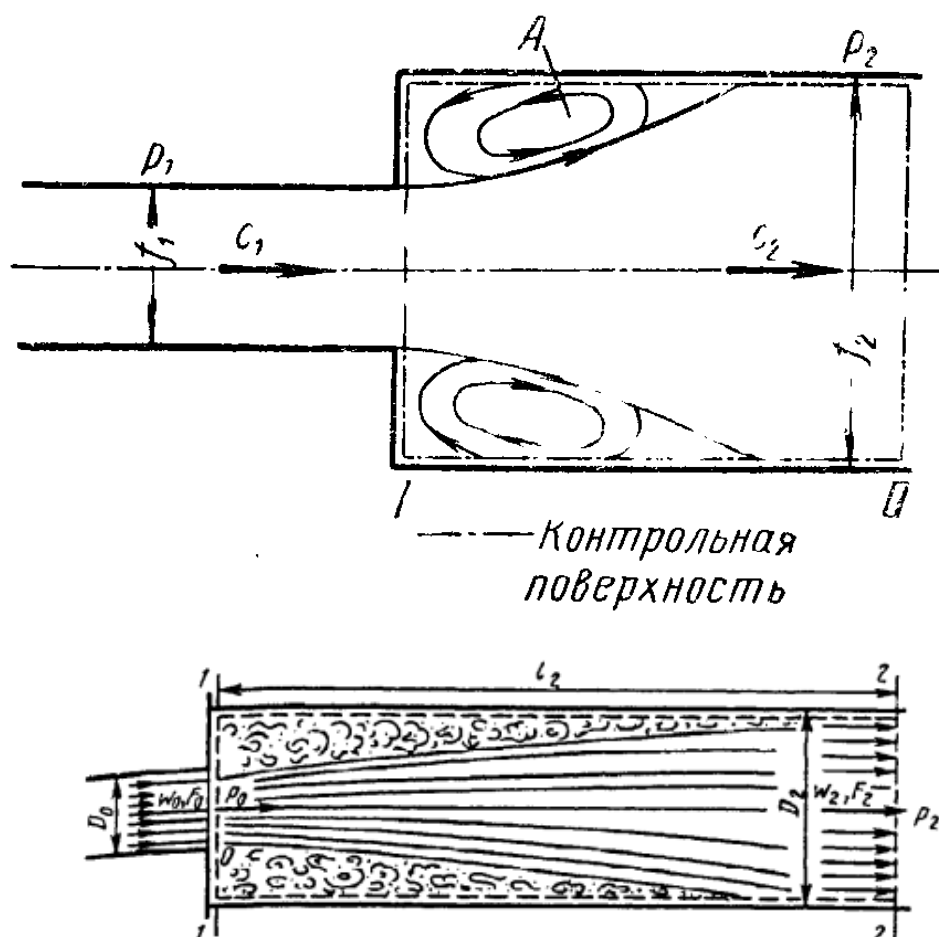


Рис. 6.1. Течение жидкости при внезапном расширении трубы

Ввиду большой сложности происходящих в местных сопротивлениях явлений в настоящее время нет надежных методов теоретического определения коэффициента ξ . Он определяется в основном экспериментально. Имеется попытка теоретически обосновать коэффициент местных потерь на случай внезапного расширения трубопровода (рис. 6.2). Используя аналогию потерь энергии при внезапном расширении с неупругим ударом твердых тел, Ж. Борда из теоремы об изменении количества движения и уравнения Бернулли вывел формулу для местных потерь при внезапном расширении потока в виде

$$h_m = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g},$$

где v_1, v_2 – скорости потока до и после внезапного расширения, т.е. потеря напора при внезапном расширении равна скоростному напору потерянной скорости, где $v = v_1 - v_2$ потерянная скорость. Это утверждение представляет собой так называемую теорему Борда – Карно. Однако более детальный анализ явления показывает, что аналогия потерь напора при внезапном расширении с потерями энергии при неупругом ударе твердых тел далеко неполная. Опытном, в частности, подтверждается, что потери напора, даваемые формулой Борда, получаются заниженными. Поэтому на основании теоретических соображений и эксперимента предложено эти потери определять по формуле

$$h_m = k \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}, \quad (6.1)$$

где k – коэффициент, определяемый опытным путем.

6.2. Варианты заданий

В качестве вариантов заданий предложены переходные размеры для стальных водогазопроводных труб по ГОСТ 3262-75.

Для выполнения данной работы необходимы следующие значения: Диаметры входной (D_1) и выходной труб (D_2), которые берутся из таблицы 7.1 для каждого из вариантов соответственно. Длины входного и выходного участков принимаются равными не менее 5 калибров (диаметров для каждой из труб соответственно)

Т а б л и ц а 6.1

Варианты заданий

1		2		3		4		5		6	
D_1	D_2	D_1	D_2	D_1	D_2	D_1	D_2	D_1	D_2	D_1	D_2
10	15	15	20	20	32	40	65	80	100	100	150

6.3. Выполнение расчёта

Модель течения для данной работы можно построить несколькими способами: последовательным вытягиванием «бобышек» дважды с соответствующими размерами, либо созданием эскиза вращения. В качестве примера рассмотрен эскиз вращения, показанный на рис.6.2.

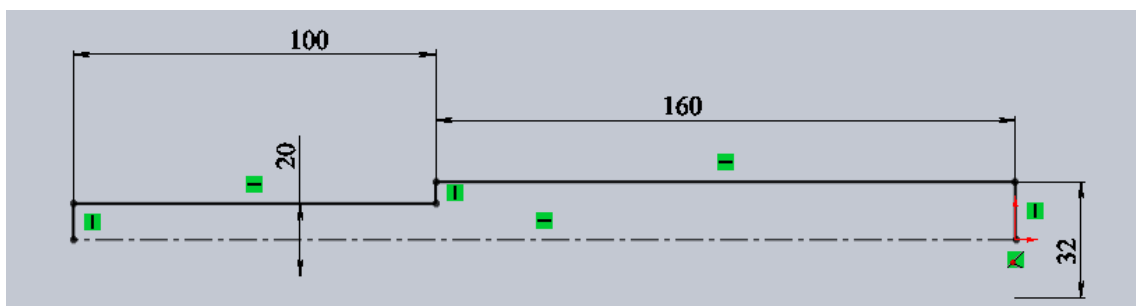


Рис. 6.2. Эскиз вращения

После создания модели генерируется сетка, с рекомендациями из раздела 1.4. В качестве наглядного примера, как должна выглядеть сетка с призматическими ячейками, можно использовать рис. 6.3.

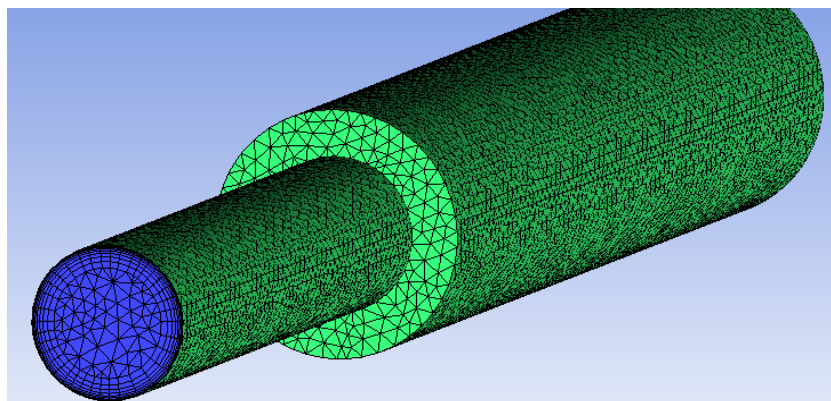


Рис.6.3. Расчетная сетка с призматическими слоями

Скорость течения рекомендуется принимать 2 м/с. После задания ГУ модель должна иметь вид, показанный на рис. 6.4.

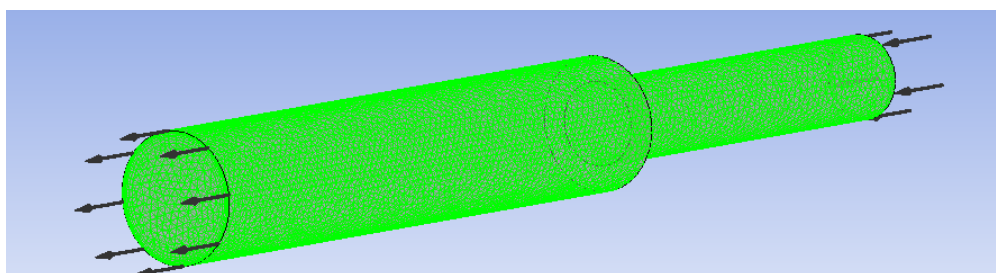


Рис.6.4. Расчетная сетка с призматическими слоями

При оформлении отчёта следует упомянуть и объяснить различия и сходства графиков полного давления (Total Pressure – рис.6.5) и скорости (Velocity – рис.6.6). Так же уместно будет показать более подробный график распределения векторов скорости на участке внезапного расширения, как показано на рис.6.7.

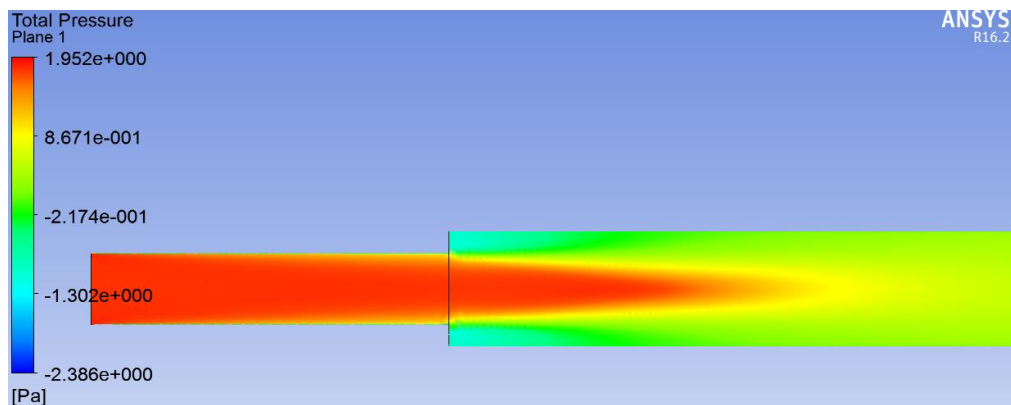


Рис. 6.5. Распределение давления при внезапном расширении

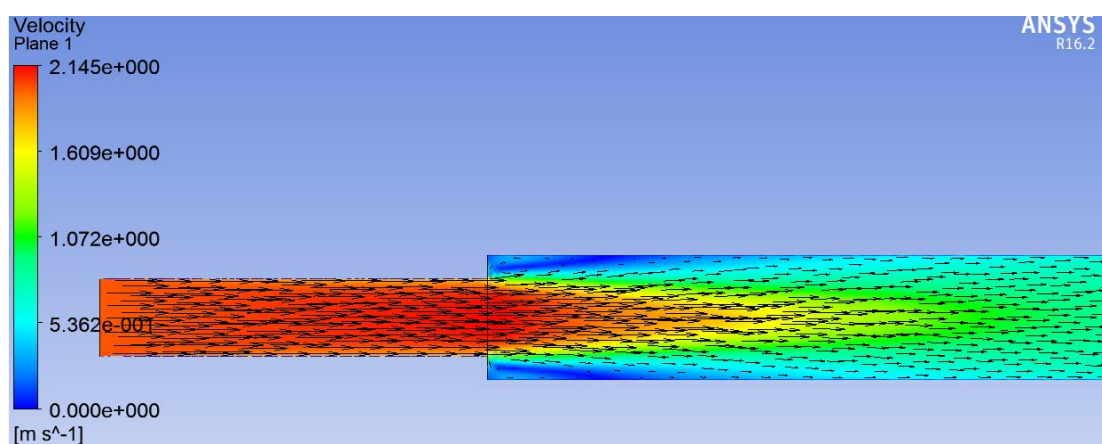


Рис. 6.6. Распределение скорости при внезапном расширении

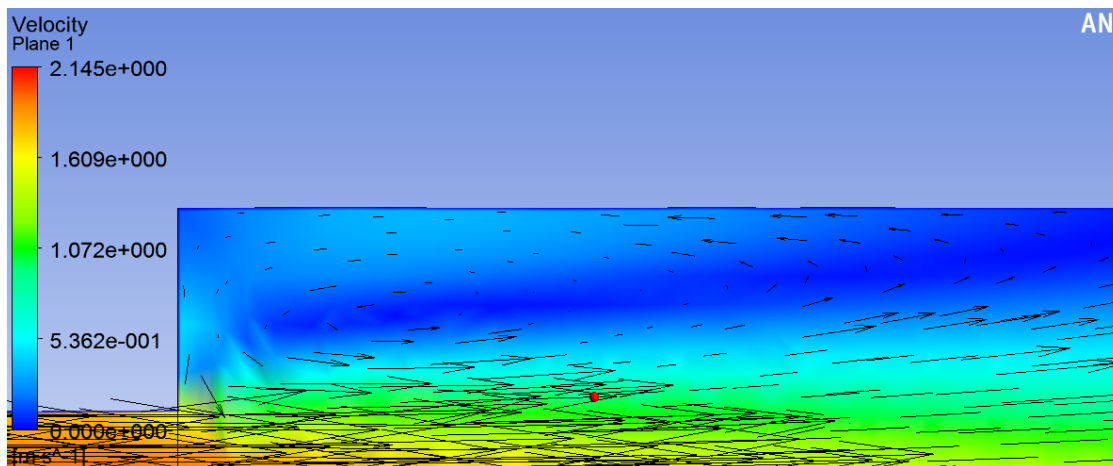


Рис. 6.7. Обратное течение при внезапном расширении

7. ТЕЧЕНИЕ ВО ВНЕЗАПНО СУЖАЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ

7.1. Общие сведения о течении при внезапном расширении

При внезапном сужении потока также, как и в предыдущей работе, образуются водоворотные зоны в результате отрыва от стенок основного потока, но они значительно меньше, чем при резком расширении трубы, поэтому и потери напора значительно меньше.

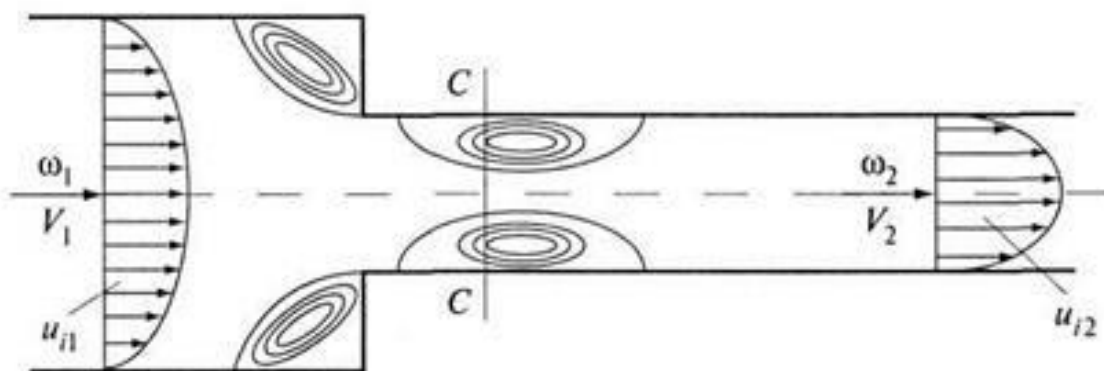


Рис. 7.1. Течение жидкости при внезапном расширении трубы

Потери напора можно определить, используя формулу Борда, полагая, что в основном потери будут за сжатым сечением, а до сжатого сечения потери напора существенно малы.

Скорость в сжатом сечении $C-C$ площадью ω_2 :

$$V_2 = \frac{Q}{\omega_2}. \quad (7.1)$$

Выразим отношение площадей сжатого сечения и площади узкой части трубы ω_2 через коэффициент ε , который называется коэффициентом сжатия:

$$\varepsilon = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (7.2)$$

Потери напора по Борда

$$h_{\text{пот}} = \left(\frac{V_1 - V_2}{2g} \right)^2. \quad (7.3)$$

Из уравнения неразрывности

$$V_2 \omega_2 = V_1 \omega_1; \quad V_1 = \frac{V_2 \omega_2}{\omega_1} = \frac{V_2}{\varepsilon}. \quad (7.4)$$

Выразим потери напора через скоростной напор:

$$h_{\text{пот}} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 \frac{V_2^2}{2g} = \zeta \frac{V_2^2}{2g}, \quad (7.5)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент сжатия ε зависит от отношения площадей узкой и широкой трубы, который может быть вычислен по формуле А. Альтшуля:

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n}, \quad (7.6)$$

где n – отношение площадей: $n = \frac{\omega_2}{\omega_1}$.

7.2. Варианты заданий

В качестве вариантов заданий предложены переходные размеры для стальных водогазопроводных труб по ГОСТ 3262-75, как и для лабораторной работы №6.

Для выполнения данной работы необходимы следующие значения: Диаметры входной (D_1) и выходной труб (D_2), которые берутся из таблицы 7.1 для каждого из вариантов соответственно. Длины входного и выходного участков принимаются равными не менее 5 калибров (диаметров для каждой из труб соответственно).

Варианты заданий

1		2		3		4		5		6	
D ₁	D ₂	D ₁	D ₂	D ₁	D ₂	D ₁	D ₂	D ₁	D ₂	D ₁	D ₂
10	15	15	20	20	32	40	65	80	100	100	150

7.3. Выполнение расчёта

Модель течения для данной работы можно построить несколькими способами: последовательным вытягиванием «бобышек» дважды с соответствующими размерами, либо созданием эскиза вращения. В качестве примера рассмотрим второй вариант создания модели: последовательное вытягивание бобышек, последовательность этих действий изображена на рис.7.2-7.4.

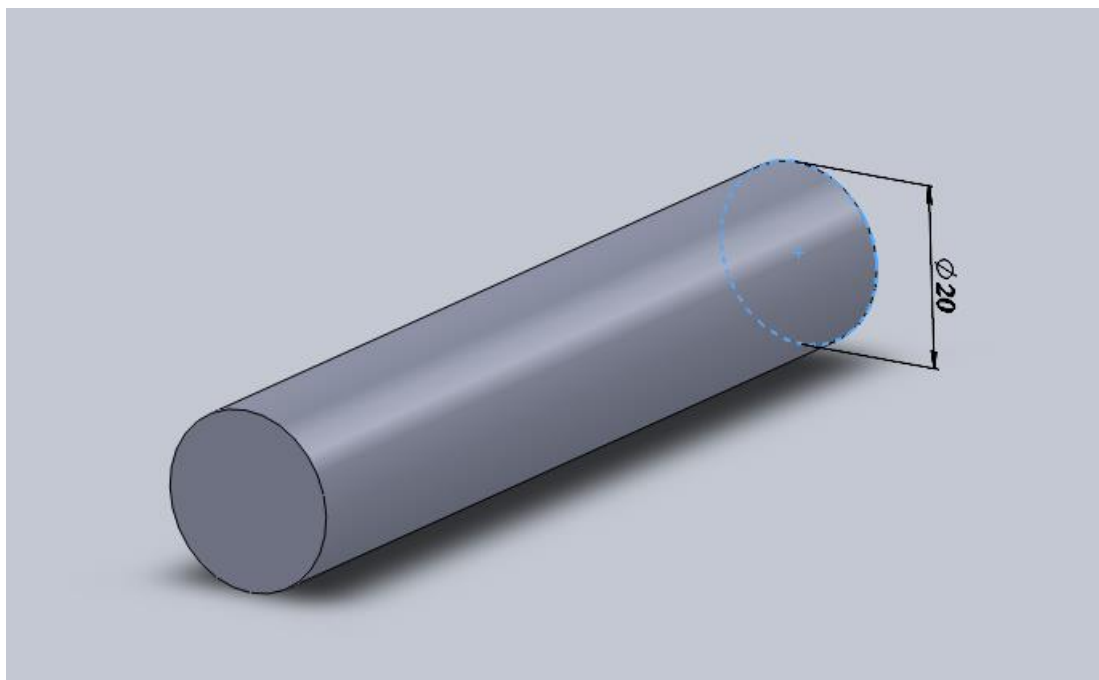


Рис.7.3. Вытягивание бобышки с диаметром 20 мм

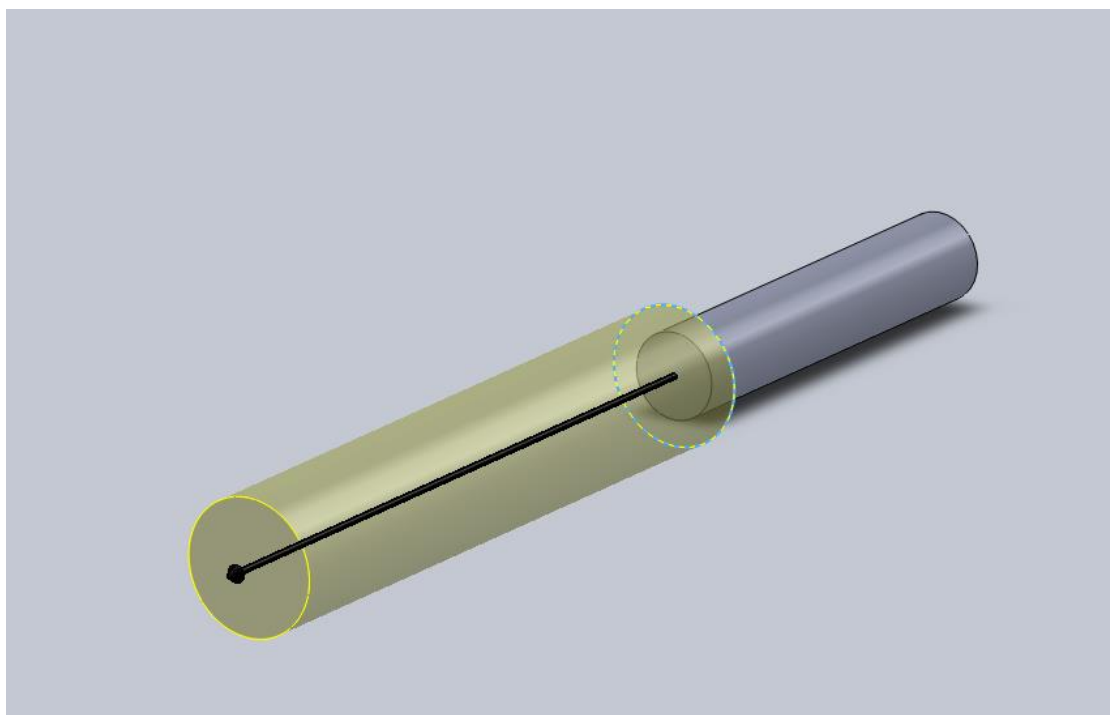


Рис. 7.4. Вытягивание бобышки с диаметром 32 мм

После создания модели генерируется сетка, с рекомендациями из раздела 1.4. В качестве наглядного примера, как должна выглядеть сетка с призматическими ячейками, можно использовать рис. 7.4.

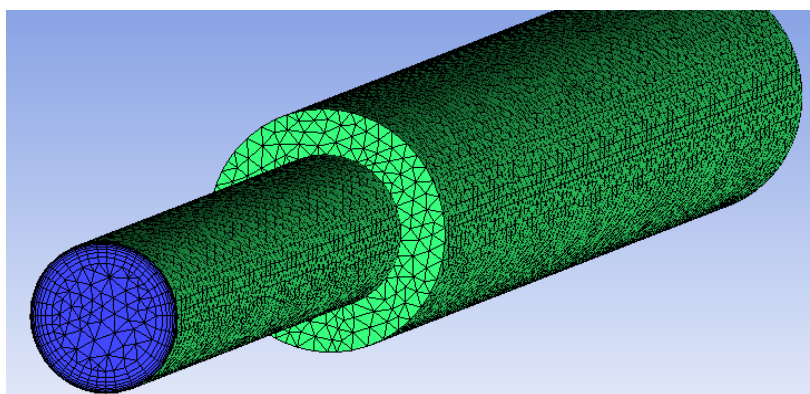


Рис. 7.5. Расчетная сетка с призматическими слоями

Скорость течения рекомендуется принимать 2 м/с. После задания ГУ модель должна иметь вид, показанный на рис. 7.5.

Так же, если предыдущая работа была выполнена, то можно поменять лишь задание граничных условий: поверхностью Inlet станет Outlet и наоборот.

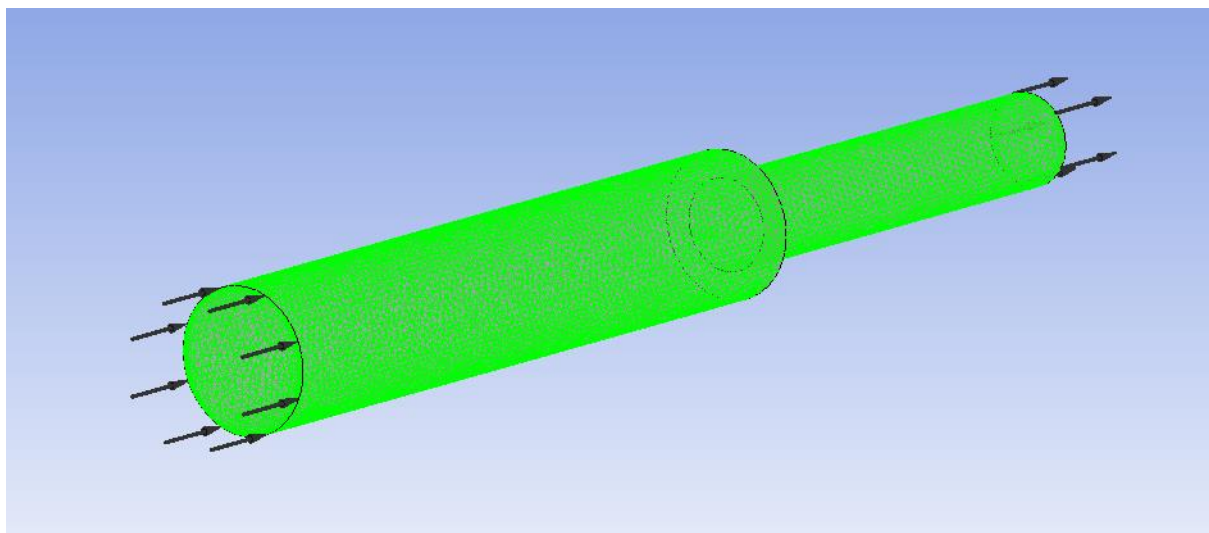


Рис. 7.6. Расчетная сетка с призматическими слоями

При оформлении отчёта следует упомянуть и объяснить различия и сходство графиков полного давления (Total Pressure) и скорости (Velocity). Так же уместно будет показать более подробный график распределения векторов скорости на участке внезапного расширения.

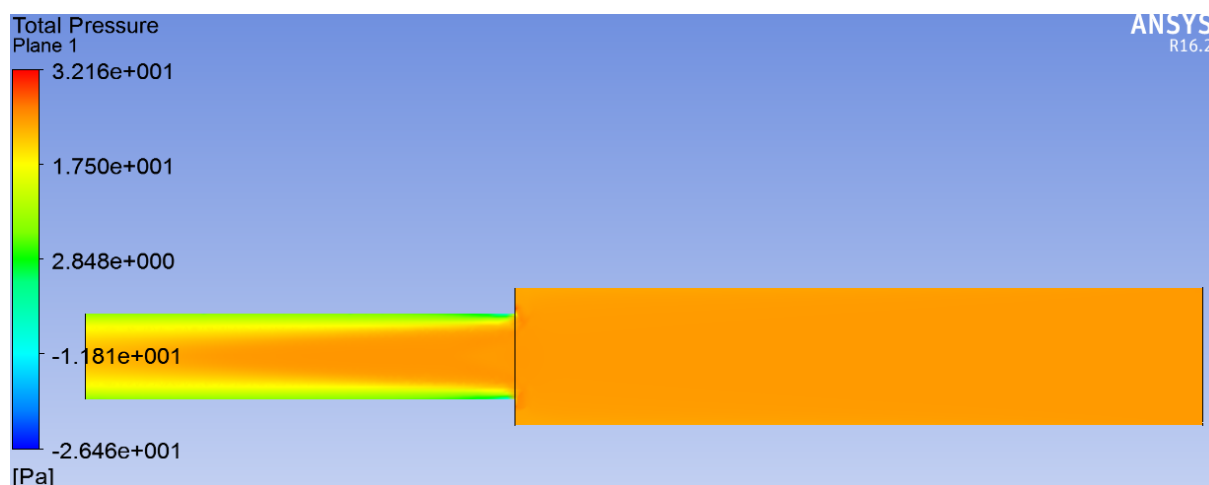


Рис. 7.7. Распределение давления при внезапном расширении

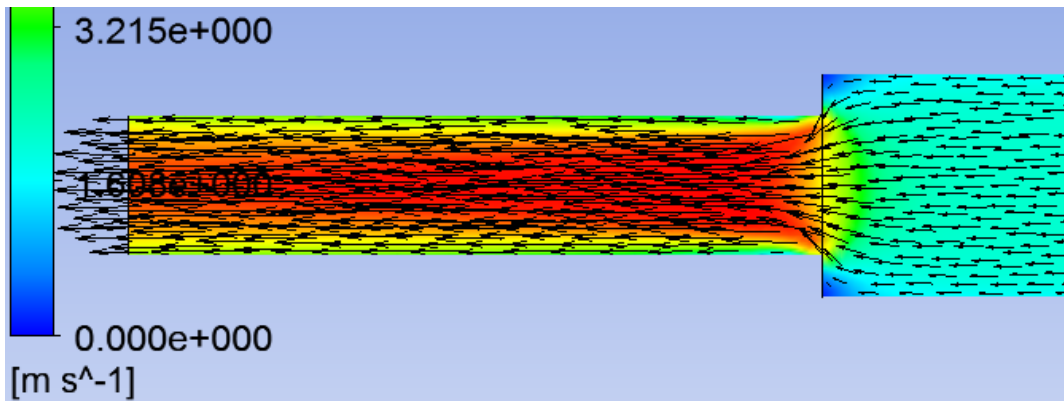


Рис. 7.8. Распределение скорости при внезапном расширении

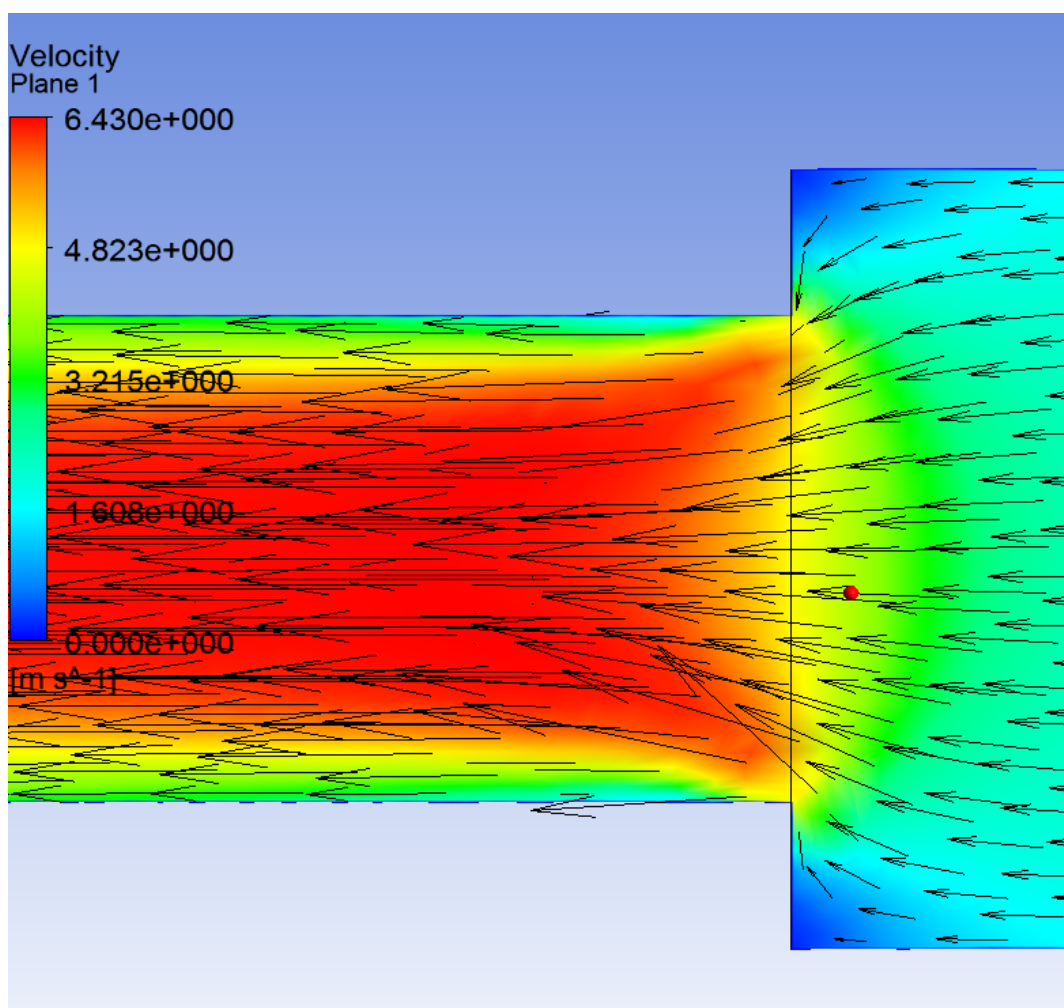


Рис. 7.9. Обратное течение при внезапном расширении

8. РАСЧЁТ ТЕЧЕНИЯ И ПОТЕРЬ В ТРУБЕ С ДРОССЕЛЬНОЙ ШАЙБОЙ

8.1. Общие сведения о дроссельных шайбах

Дроссельная шайба представляет собой дросселирующее устройство, вставляемое в трубу для увеличения местного гидравлического сопротивления потоку жидкости, пара или газа, в зависимости от рабочего тела. Применяется это устройство в паровых котлах, аппаратах для выравнивания расхода по параллельно включённым трубам, для устранения пульсаций давления в трубопроводных системах поршневых компрессоров и насосов и т. д.

8.2. Варианты заданий

Расчёт дроссельной диафрагмы описан в СП 41-101-95 «Проектирование тепловых пунктов» или в книге «Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей» авторов В.И. Манюк, Я.И. Каплинский и др., или по формуле:

$$D_2 = 10 \sqrt[4]{\frac{G^2}{\Delta H}}, \quad (8.1)$$

где G – массовый расход воды в трубопроводе, т/ч, ΔH – напор, гасимый дроссельной шайбой, м. Минимальный диаметр дроссельной шайбы должен быть не менее 3 мм.

Для выполнения данной работы необходимы следующие значения: диаметр трубы (D_1) и падение давления на шайбе (ΔH), которые берутся из таблицы 7.1 для каждого из вариантов соответственно. Скорость течения воды в трубе принимаем равной 2

м/с, а плотность 997 кг/м³. Длины входного и выходного участков принимаются равными не менее 2-3 калибра и 5 калибров соответственно (диаметров для каждой из труб соответственно).

Т а б л и ц а 8.1

Варианты заданий

1		2		3		4		5		6	
D ₁	ΔH	D ₁	ΔH	D ₁	ΔH	D ₁	ΔH	D ₁	ΔH	D ₁	ΔH
15	20	20	40	32	35	40	40	80	25	100	15

8.3. Выполнение расчёта

Модель течения для данной работы можно построить несколькими способами: последовательным вытягиванием «бобышек» трижды с соответствующими размерами, либо созданием эскиза вращения. Все эти примеры были уже рассмотрены ранее в работах № 6 и 7. В качестве примера рассмотрим второй вариант создания модели: эскиз вращения, показанный на рис. 8.1.

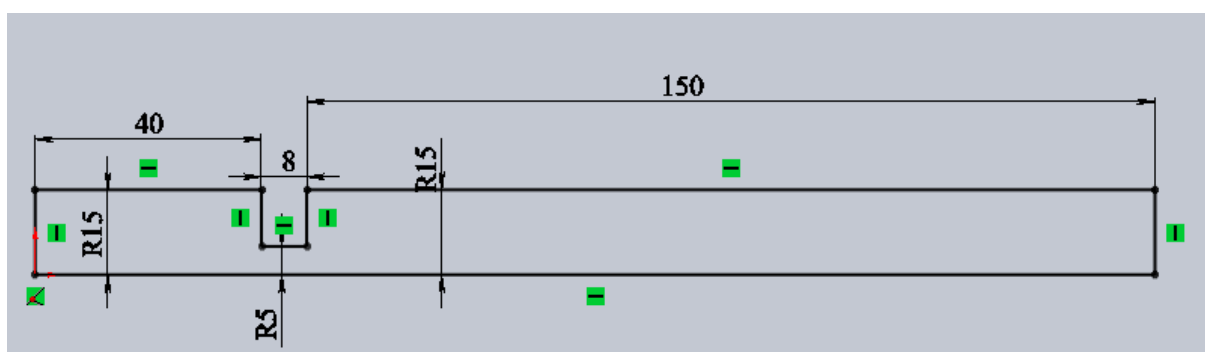


Рис. 8.1. Эскиз вращения модели течения

При оформлении отчёта следует включить графики полного давления (Total Pressure – рис. 8.2.) и скорости (Velocity – рис. 8.3). Так же уместно показать более подробный график распределения

векторов скорости на участке внезапного сужения и расширения, как показано на рис. 8.3.

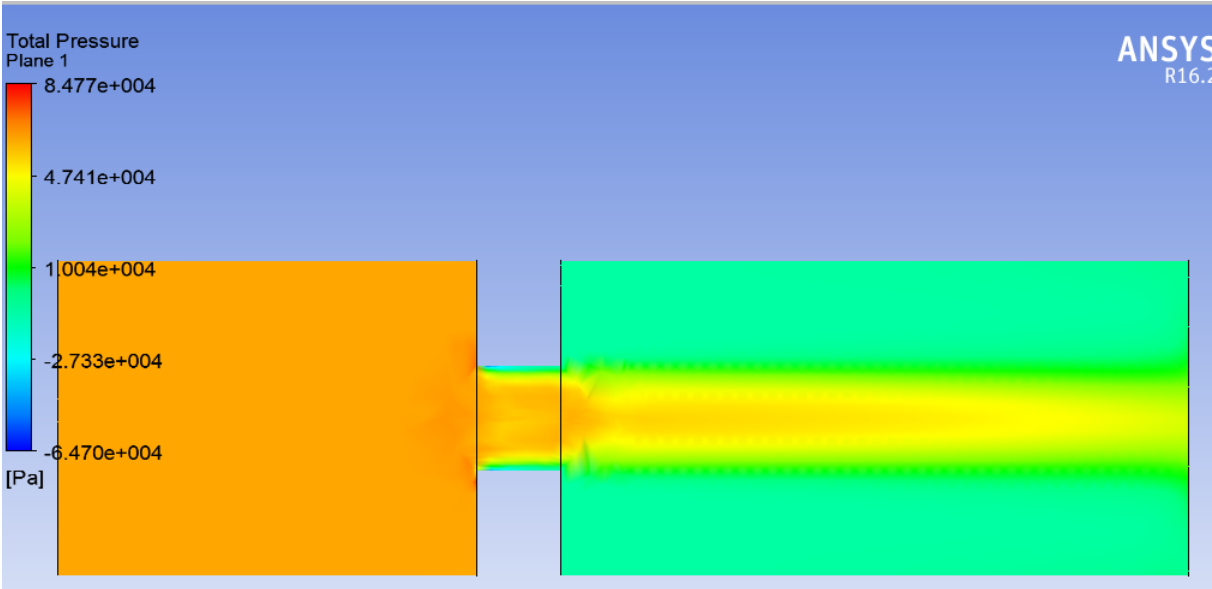


Рис. 8.2. Распределение давления при внезапном расширении

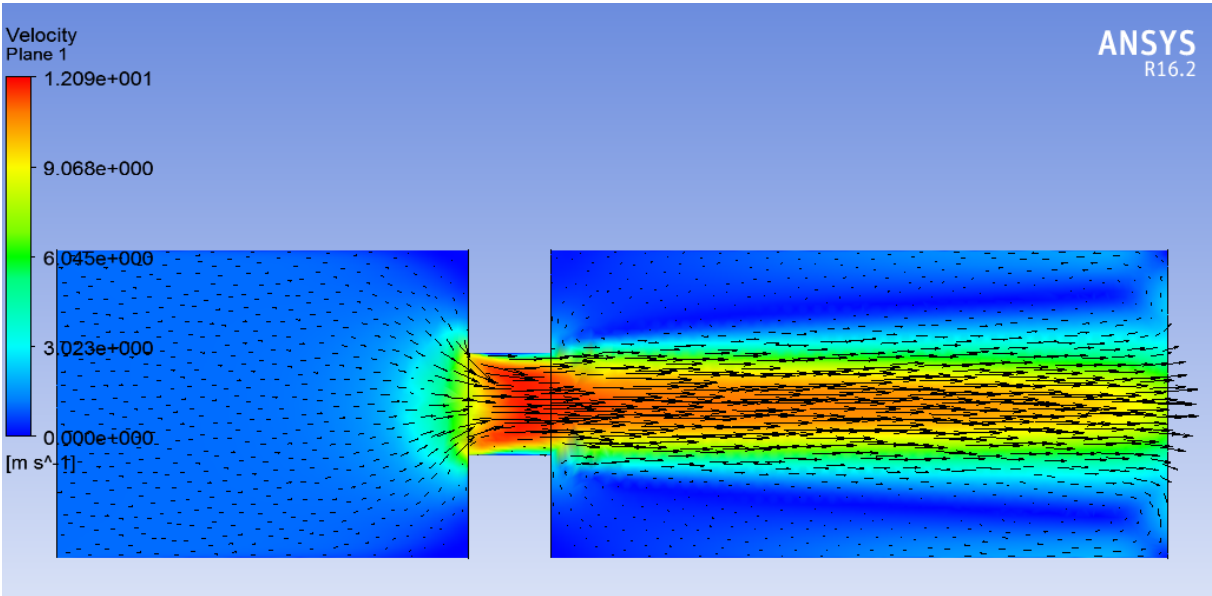


Рис. 8.3. Распределение скорости при внезапном расширении

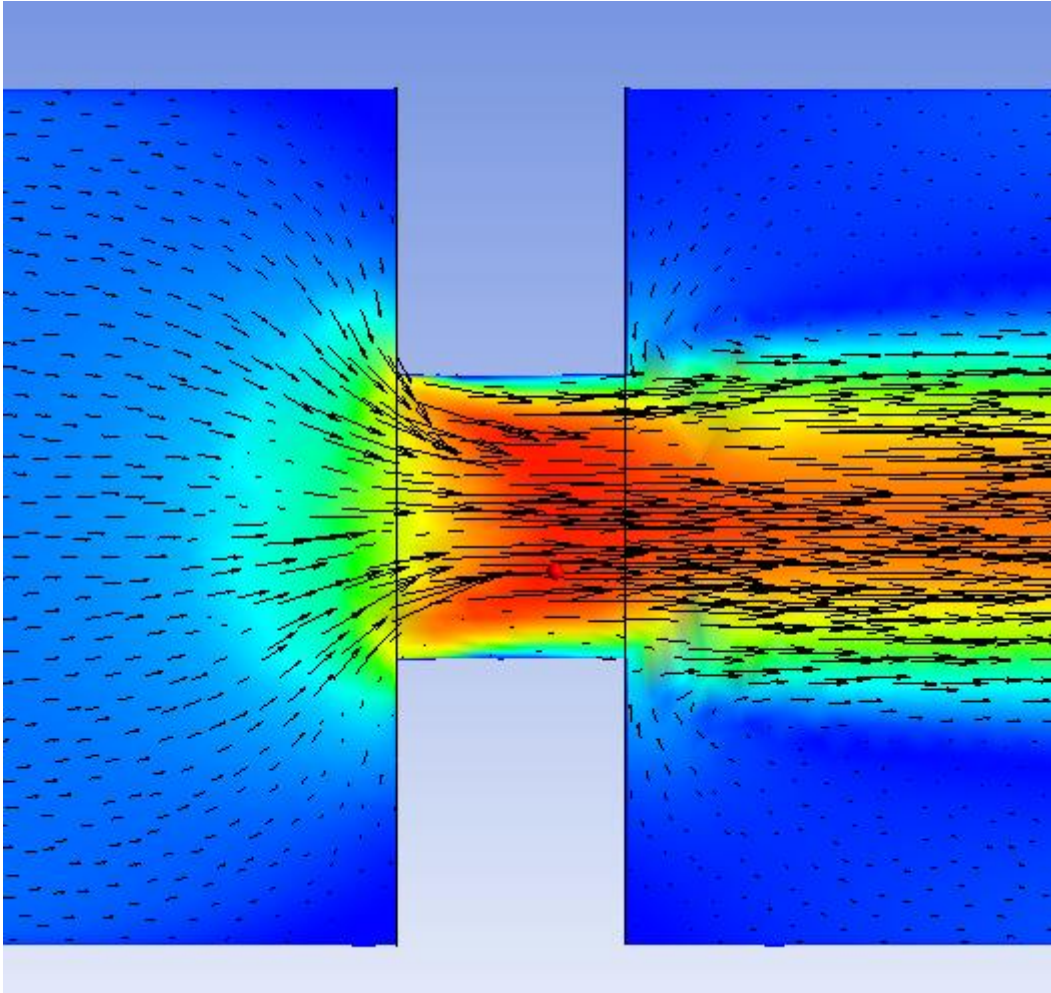


Рис. 8.4. Обратное течение при внезапном расширении

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа: учебник для вузов. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
2. *Жарковский А.А.* Механика жидкости и газа. Гидромеханика : учеб. пособие / А.А. Жарковский. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. 2011. — 228 с.
3. *Вайсман Н.М.* Механика жидкости и газа. Гидравлика : учеб. пособие / Н.М. Вайсман, В.А. Голиков, А.А. Жарковский. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. — 222 с.
4. *Пугачев П.В.* Расчет и проектирование лопастных гидромашин. Расчет вязкого течения в лопастных гидромашинках с использованием пакета ANSYS CFX : учеб. пособие / П.В. Пугачев, Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. -120 с.
5. *Дударева Н.Ю., Загайко С.А.* Solidworks 2009 на примерах. СПб.: БХВ - Петербург, 2009. - 544с.
4. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / И.А. Белов, С.А. Исаев, Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2001. -108 с.
5. *Снегирев А.Ю.* Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: Учеб. пособие. СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2009. -143 с.
6. *Аникеев А.А., Молчанов А.М., Янышев Д.С.* Основы вычислительного теплообмена и гидродинамики: учебное пособие - Книжный дом "Либроком", 2010. – 152 с.
7. *Гарбарук А.В.* Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.

*Арбузов Марк Анатольевич
Жарковский Александр Аркадьевич*

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА
Расчет вязкого течения в типовых элементах гидромашин

Учебное пособие

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93. т. 2; 95 3005 – учебная литература

Подписано в печать xx.xx.2016. Формат 60×84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 5,0. Тираж 100. Заказ _____.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами,
в типографии Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14