

Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт энергетики и транспортных систем

Работа допущена к защите
Заведующий кафедрой
_____ Ю.В.Кожухов
«__» _____ 2019г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

ВЕРИФИКАЦИЯ CFD РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЙ ДЛЯ ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ЦЕНТОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

по направлению 13.03.03 – Энергетическое машиностроение
по образовательной программе

13.03.03_06 – Компрессорные и холодильные машины и установки

Выполнил

студент гр.43224/1

Руководитель

доц., к.т.н.

Ю.В.Кожухов

Консультант

асс.асп.

А.М.Данилишин

Санкт-Петербург

2019

Содержание

Содержание	2
Введение	3
1. Цель и задачи работы	Ошибка! Закладка не определена.
2. Описание программного комплекса ANSYS 18.0.	7
3. Описание используемых модулей ANSYS 18.0.....	8
3.1. Модуль Geometry	8
3.2. Модуль ICEM CFD	9
3.3. Модуль CFX	12
4. Моделирование и анализ результатов	21
Заключение	39
Список используемой литературы	40

Введение

Наш мир развивается очень стремительно, соответственно развиваются и различные отрасли в промышленности такие как: горно-химическая, черная и цветная металлургия, добыча нефти и газа и так далее. Во многих отраслях промышленности как тяжелой, так и легкой используются специальные устройства, которые называются компрессоры.

Компрессор – это энергетическая машина, которая необходима для сжатия и перемещения газа под давлением, например воздуха, азота и прочих. Данные машины можно квалифицировать по-разному. Самая распространенная квалификация компрессоров – это квалификация по принципу действия. Различают две группы энергетических машин: объёмные и динамические. Объёмные в свою очередь делятся на компрессоры с возвратно-поступательными движениями вытеснения (поршневые, мембранные, плунжерные, свободнопоршневые дизель компрессоры) и с вращательным движением вытеснителя (винтовые, спиральные, водокольцевые, ротационно-пластинчатые). Динамические бывают центробежные, осевые, вихревые, дисковые, струйные или инжекторные, диагональные.

Как отмечалось выше компрессоры используются в очень многих областях промышленности, так же без них не обойтись в энергетике. Например, турбокомпрессоры повсеместно находят свое применение для турбнаддува двигателей внутреннего сгорания, газотурбинных двигателях. Не стоит забывать про оборонную и космическую промышленность (ракеты, истребители), пневмосистемы, так же используются в системах кондиционирования для того, чтобы получить холод, необходимый на производстве. Исходя из всего того, что изложено выше становится ясно, что компрессоры – это очень нужные устройства и следует совершенствовать эти агрегаты, а точнее повышать коэффициент полезного действия компрессора.

Ведь повышая коэффициент полезного действия даже на десятые доли, происходит весьма существенная экономия денежных ресурсов.

В турбомашинах есть такой элемент, который называется уплотнения. Различают внешние и внутренние уплотнения. Внешние уплотнения нужны для того, чтобы изолировать внутреннее пространство от атмосферы, а внутренние необходимы для того, чтобы отделять участки внутри компрессора с различным давлением. В большинстве случаев внутренние уплотнения выполняют в виде лабиринтных.

Лабиринтные уплотнения применяют для уменьшения утечек газа между неподвижными и подвижными (вращающимися) деталями компрессора. Они состоят из ряда гребней с острыми кромками, которые расположены один за другим. Возникают некие камеры между гребнями. Когда газ проходит под этими самыми гребнями, то его скорость увеличивается, а затем, когда газ попадает в камеру он расширяется, то есть его скорость снижается и кинетическая энергия переходит в тепловую. Стоит отметить, что замедление газа происходит изобарически, так как размер камеры гораздо больше щели через, которую газ перетекает. И так как таких гребней не один, а несколько, то такой процесс с торможением газа происходит несколько раз, тем самым давление вдоль лабиринтного уплотнения уменьшается. Лабиринтные уплотнения не идеальны и естественно имеются потери, в среднем это 2 – 6% от массы газа, который всасывается, так же процент потерь зависит от габаритов машины. Различают разные лабиринтные уплотнения, некоторые из них изображены на рисунке 1.

- а) с прямыми гребешками
- б) с наклоненными гребешками
- в) с шахматным расположением гребешков
- г) со ступенчатым расположением гребешков
- д) с взаимным зацеплением

е) истираемое (прирабатываемое)

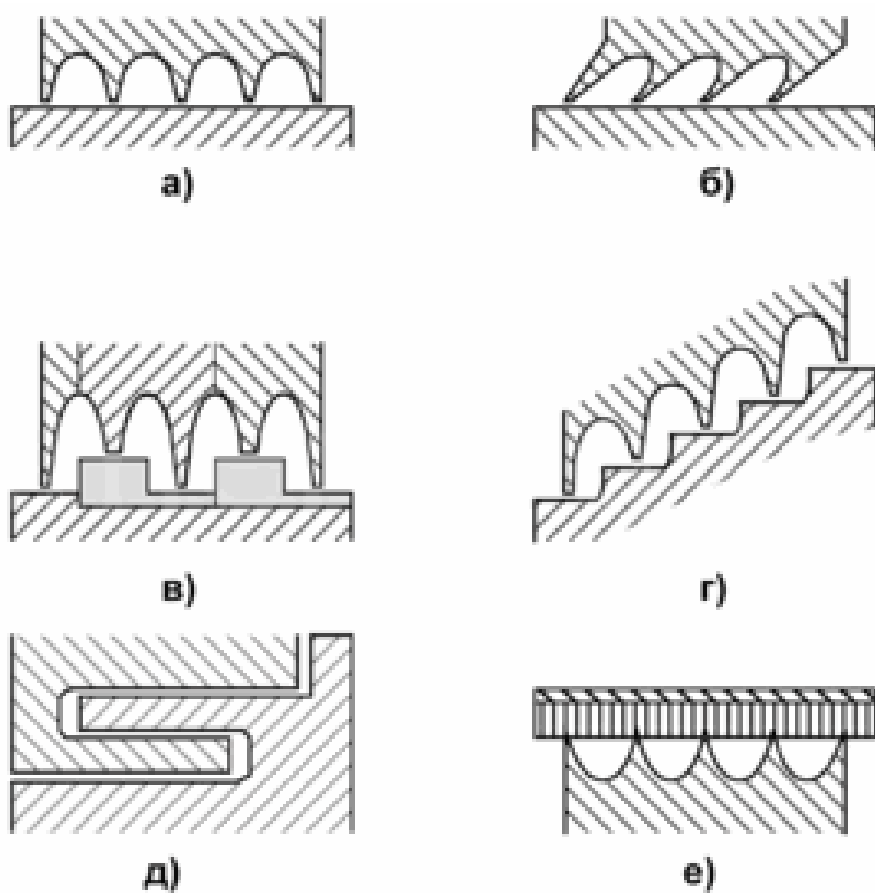


Рис.1 Виды лабиринтных уплотнений

В России в городе Пермь ООО «Джон Крейн – Искра» производит лабиринтные уплотнения. В данной работе для расчетов использовались лабиринтные уплотнения с прямыми гребешками.

1. Цель и задачи работы

Целью данной работы является верификация CFD расчета течений для лабиринтных уплотнений центробежного компрессора, то есть найти такое сочетание параметров сетки, при котором не изменялись результаты моделирования при изменении сетки.

В ходе работы были поставлены и выполнены задачи для достижения цели:

1. Создание 3D модели лабиринтного уплотнения с прямыми гребешками.
2. Создание сетки и проведение расчётов в программном комплексе ANSYS 18.0.
3. Обработка и сравнение результатов расчётов.

2. Описание программного комплекса ANSYS 18.0.

ANSYS 18.0. – это программная система конечно-элементного анализа, которая предназначена для решения различных задач механики твёрдого тела, механики жидкости и газа, теплопередачи и прочее. В данной работе моделирование проводилось в самостоятельной программе ANSYS CFX 18.0.

ANSYS CFX – это отдельная программа комплекса ANSYS, с помощью которой можно решать разные задачи в области газодинамики, предполагает использование метода конечных элементов, на основе этих элементов область, которая представлена к расчету делится на множество расчетных ячеек. Для каждой ячейки выполняется закон сохранения энергии, массы и импульса в интегральной форме, которая далее преобразовывается в систему алгебраических уравнений. Проводимый расчёт в данной программе – это совокупность задействованных модулей, которые используются поэтапно.

В текущей работы использовалось три модуля, а именно:

1. Geometry
2. ICEM CFD
3. CFX



Рис.2. Расположение модулей в Workbench

3. Описание используемых модулей ANSYS 18.0.

3.1. Модуль Geometry.

Начало работы начинается с того, что необходимо построить 3D модель лабиринтного уплотнения в модуле Geometry в программе ANSYS 18.0. в приложении Design Modeler. Представленный модуль (Geometry) позволяет строить 2D и 3D модели, которые нужны для расчётов и вычислений. Стоит отметить, что данный модуль позволяет импортировать готовые модели из сторонних программ CAD (Computer Aided Design) или САПР (система автоматизированного проектирования) – это многофункциональный комплекс средств, который нужен для автоматизации проектирования. При создании модели различают несколько этапов, один из которых крайне важен – это разделение поверхности модели на самостоятельные части, которые выполняют различные функции, разделение необходимо для того, чтобы задать граничные условия. Например, Inlet и Outlet это поверхности через которые газ входит и выходит соответственно. На рисунке 3.1. изображена 3D модель сектора проточной части лабиринтного уплотнения.

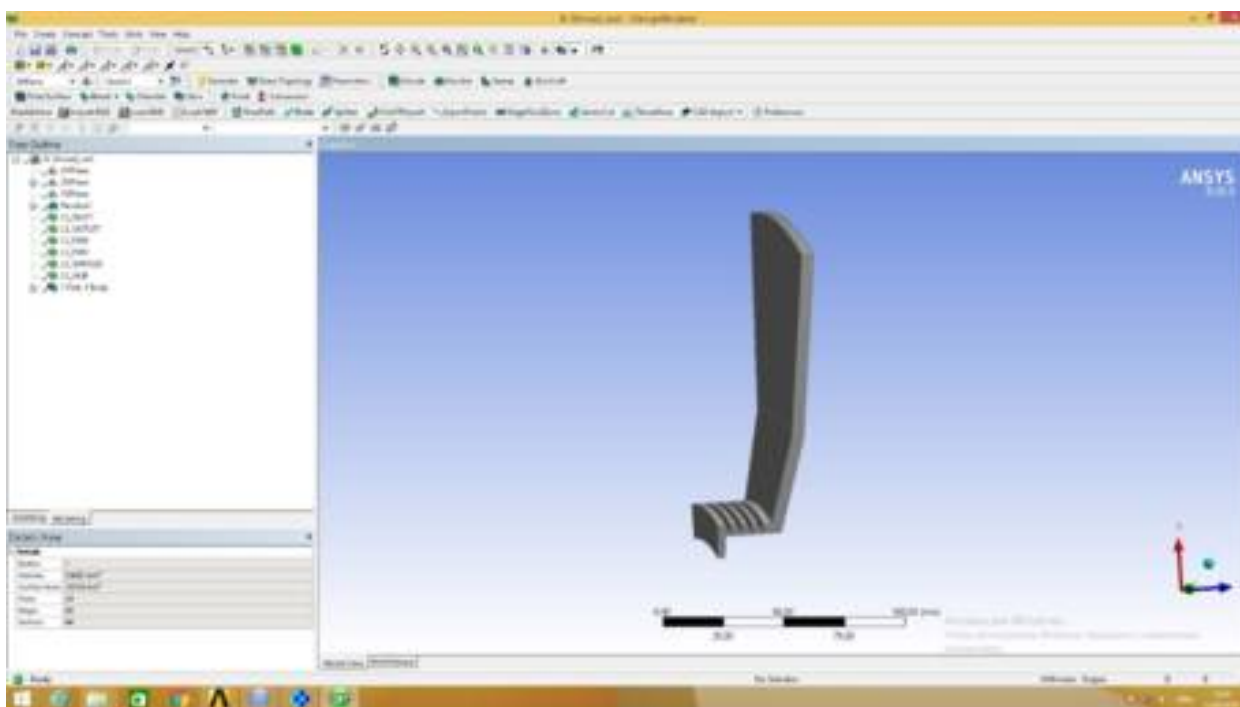


Рис.3.1. Геометрия сектора лабиринтного уплотнения

3.2.Модуль ICEM CFD.

Ещё одним не менее важным этапом, который необходим для численного моделирования потока, является создание сетки. Стоит заметить, что все сетки можно разделить на две группы: структурированные и неструктурированные. Структурированные сетки представляют собой матрицу и используют такие сетки для моделей с простой геометрией, точнее с простой геометрией расчётных областей. Неструктурированные сетки – это одномерный массив, который содержит все элементы сетки, в добавок к этому указываются связи между элементами. Неструктурированные сетки строят для модели, которая имеет сложную геометрию, но стоит отметить, что расчёт на таких сетках идёт дольше. Существует разновидность структурированной сетки, которая называется блочно-структурированная сетка. Суть такой сетки состоит в том, что 3D модель разбивается на более мелкие части – блоки, затем ассоциируют (привязывают) линии блоков с гранями, далее задаётся количество элементов на каждой грани блока и, если необходимо задаётся пристеночный элемент. Разбиение модели на блоки представлено на рисунке 3.2.1.

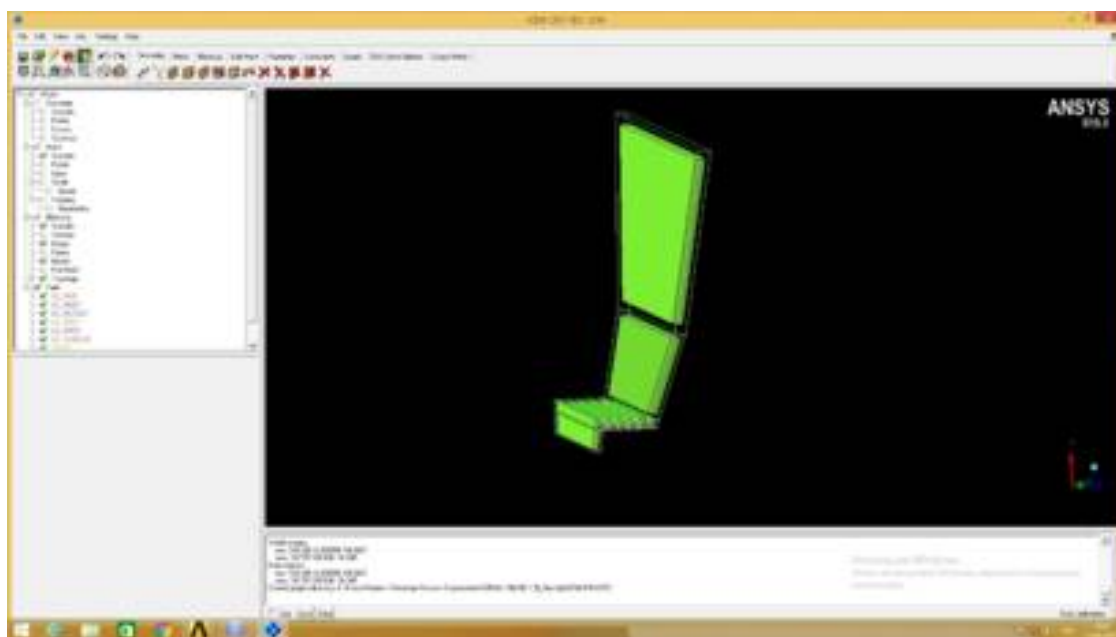


Рис.3.2.1. Разбиение модели на блоки

Расчётная сетка для данного лабиринтного уплотнения создавалась на основе модели из модуля Geometry в модуле ICEM CFD. ICEM CFD – это программный модуль ANSYS’а, который позволяет строить структурированные и неструктурированные сетки, так же поддерживает импорт из сторонних программ CAD или САПР. Помимо этого, обладает множеством инструментов для гибкой настройки и оценки сетки. Для лабиринтных уплотнений подходящим вариантом является блочно-структурированная сетка. Не мало важным фактором является правильная установка сгущения сетки для расчета пограничных течений в пристеночном слое. Этот метод при правильной настройке сетки позволяет без потери точности экономить время на расчёты, но в то же время данный метод требует больше времени для построения сетки. В текущей работе критерием оценки качества сетки являлось значение минимальных углов блочно-структурированной сетки, эти углы должны быть больше 35 градусов. В одном из вариантов сетки на рисунке 3.2.2. минимальный угол равен 78,3 градуса.

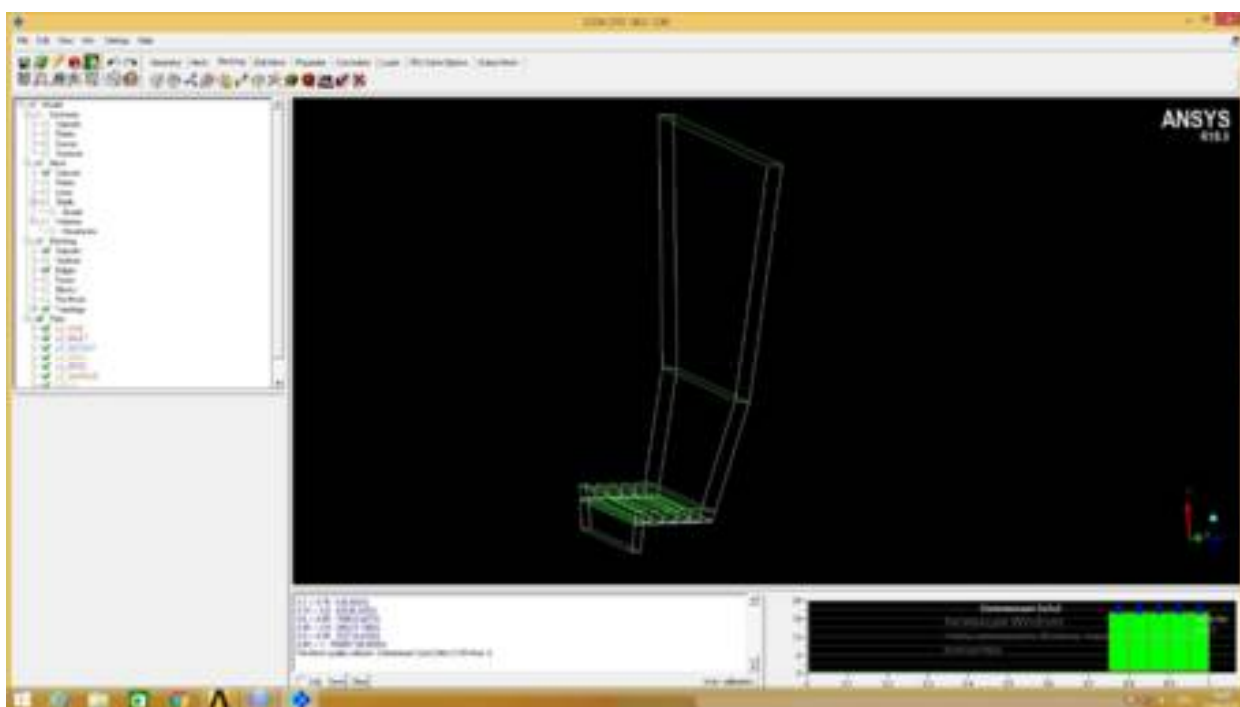


Рис 3.2.2. Минимальный угол блочно-структурированной сетки.

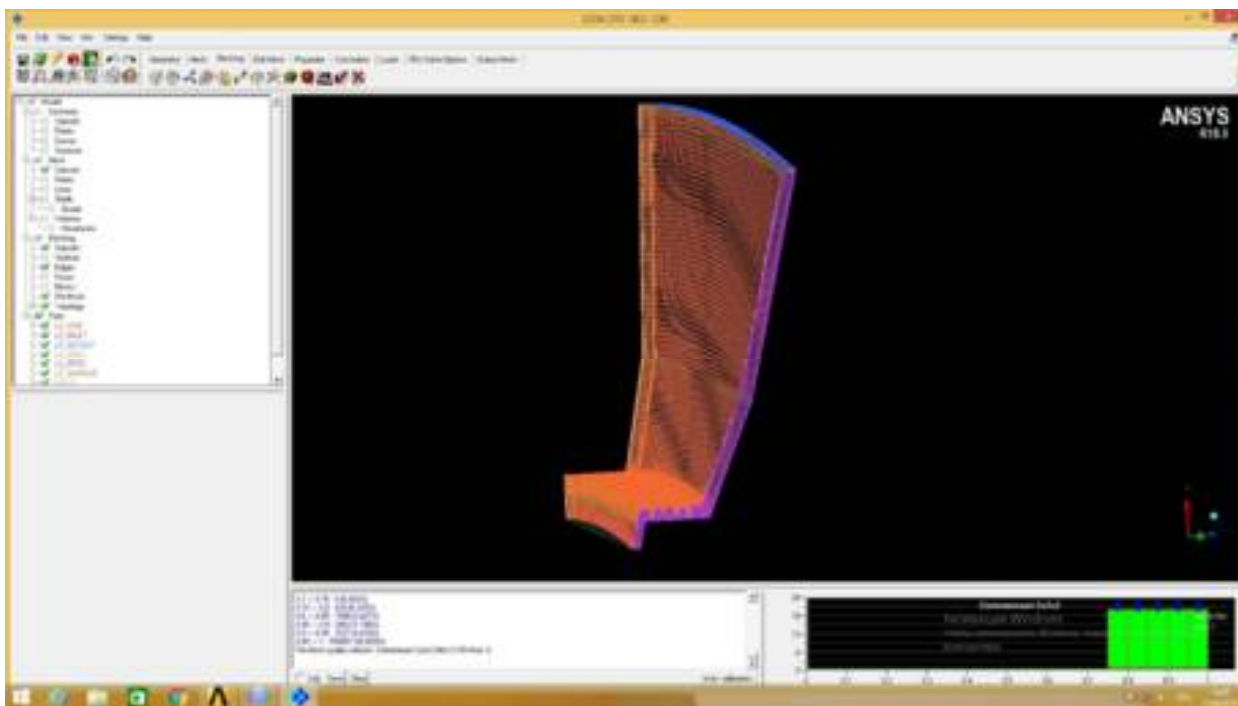


Рис.3.3. Блочнo-структурированная сетка сектора лабиринтного уплотнения.

3.3. Модуль CFX.

Модуль CFX в программном комплексе ANSYS 18.0. состоит из нескольких подмодулей, а именно CFX-Pre, CFX-Solver, CFX-Post. В самой программе это выглядит следующим образом, показано на рисунке 3.3.1.



Рис.3.3.1. Модуль CFX в ANSYS.

CFX-Pre – это подмодуль с достаточно большим количеством выбора граничных условий. Он реализует процесс определения физики задачи. CFX-Pre импортирует сетку, которая была построена или импортирована из сторонней программы CAD ранее. На данном этапе задаются граничные условия, а также выводится физическая модель в которой далее будет происходить симуляция процесса. Ниже на примере лабиринтного уплотнения будет показана работа в CFX-Pre.



Рис.3.3.2. Интерфейс CFX-Pre.

Во вкладке Basic settings задаются граничные условия, в данном случае для LS_HUB граничное условие – wall, LS_In – opening, LS_Out – outlet, LS_SHROUD – wall, LS_Per 1 и LS_Per 2 – Interface. Всё это показано ниже.

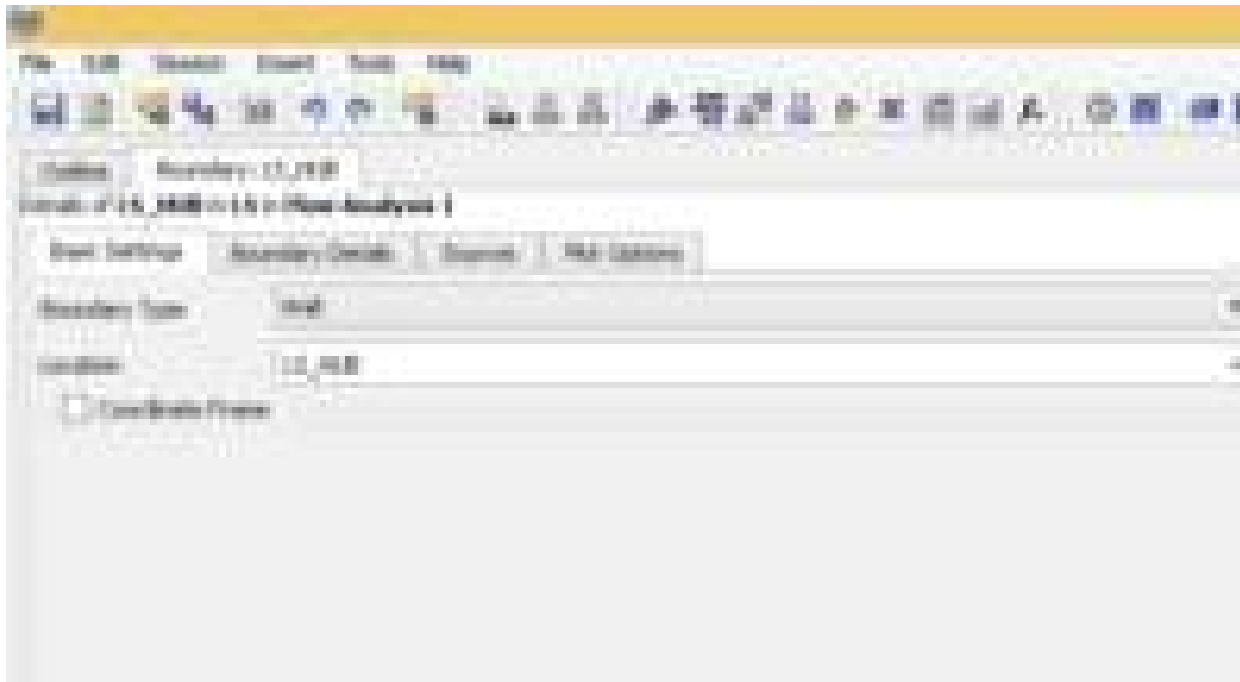


Рис.3.3.3. Boundary type для LS_HUB

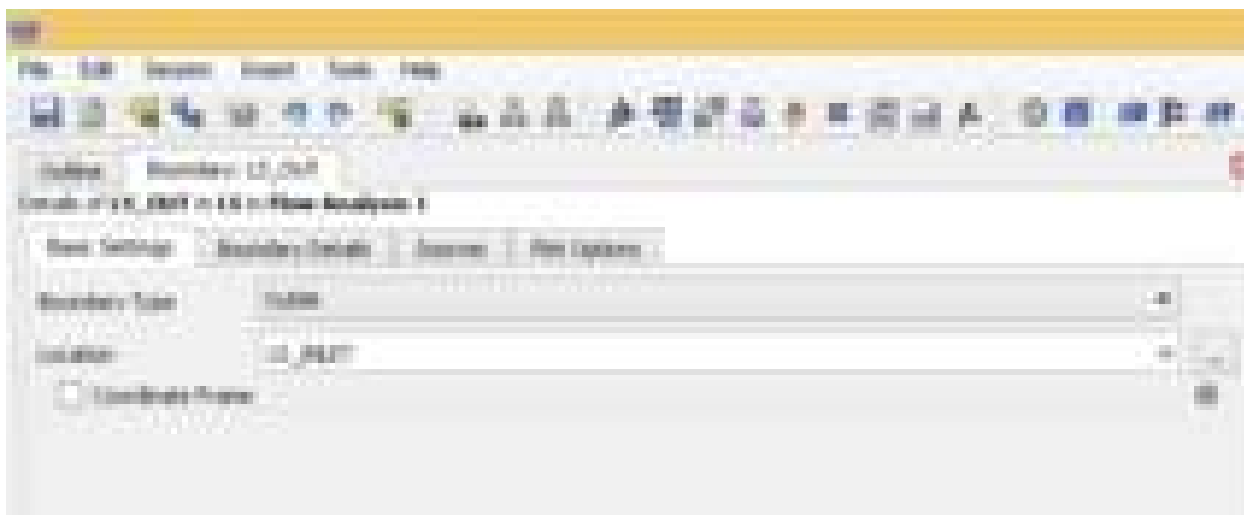


Рис.3.3.4. Boundary type для LS_OUT

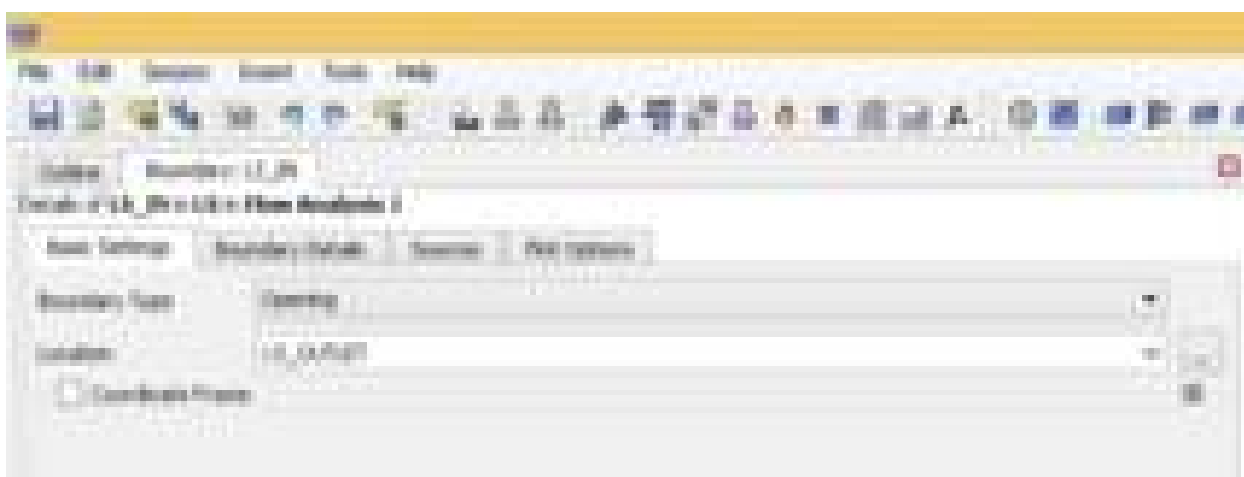


Рис.3.3.5. Boundary type для LS_IN

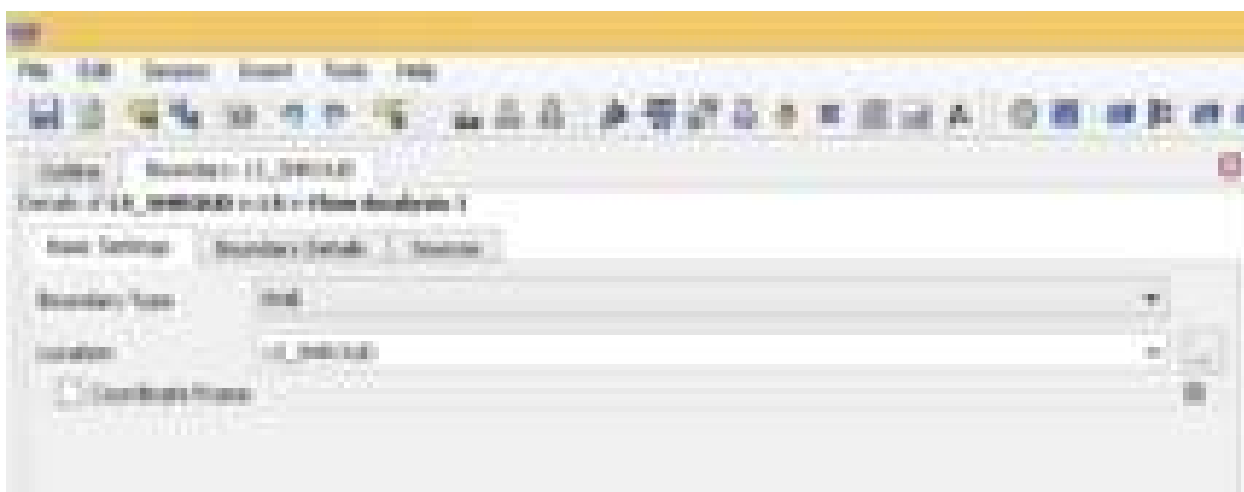


Рис.3.3.6. Boundary type для LS_SHROUD

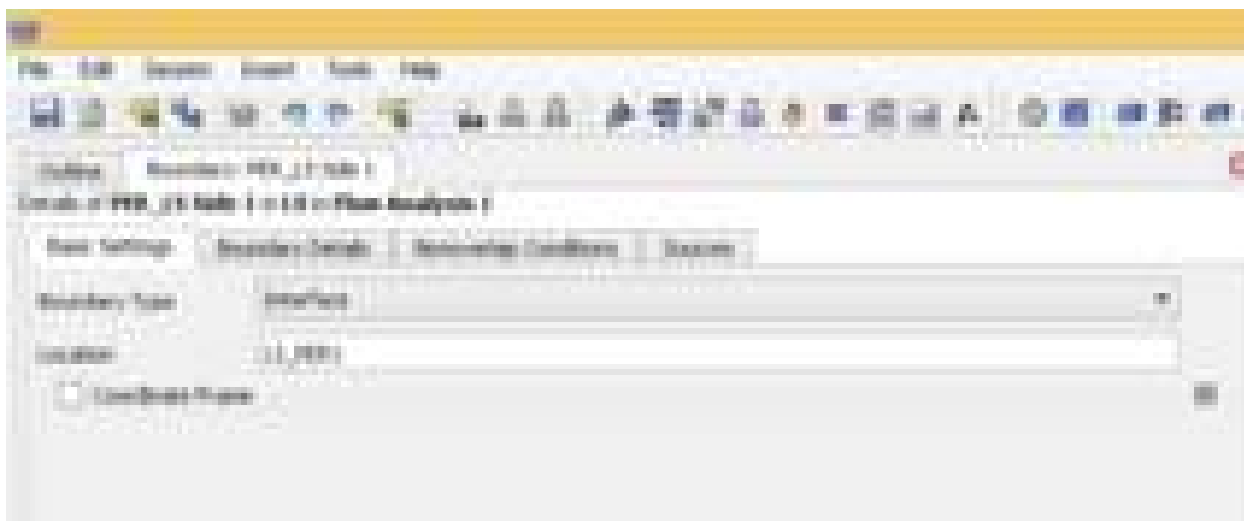


Рис.3.3.6. Boundary type для LS_PER1 и LS_PER2.

Далее во вкладке Boundary Details задаются численные параметры такие как давление, температура, скорость вращения, углы поворота, как это делается также будет показано ниже на изображениях.

Для поверхности LS_HUB задавалась скорость вращения, в данном случае это 10569.7 оборотов в минуту.

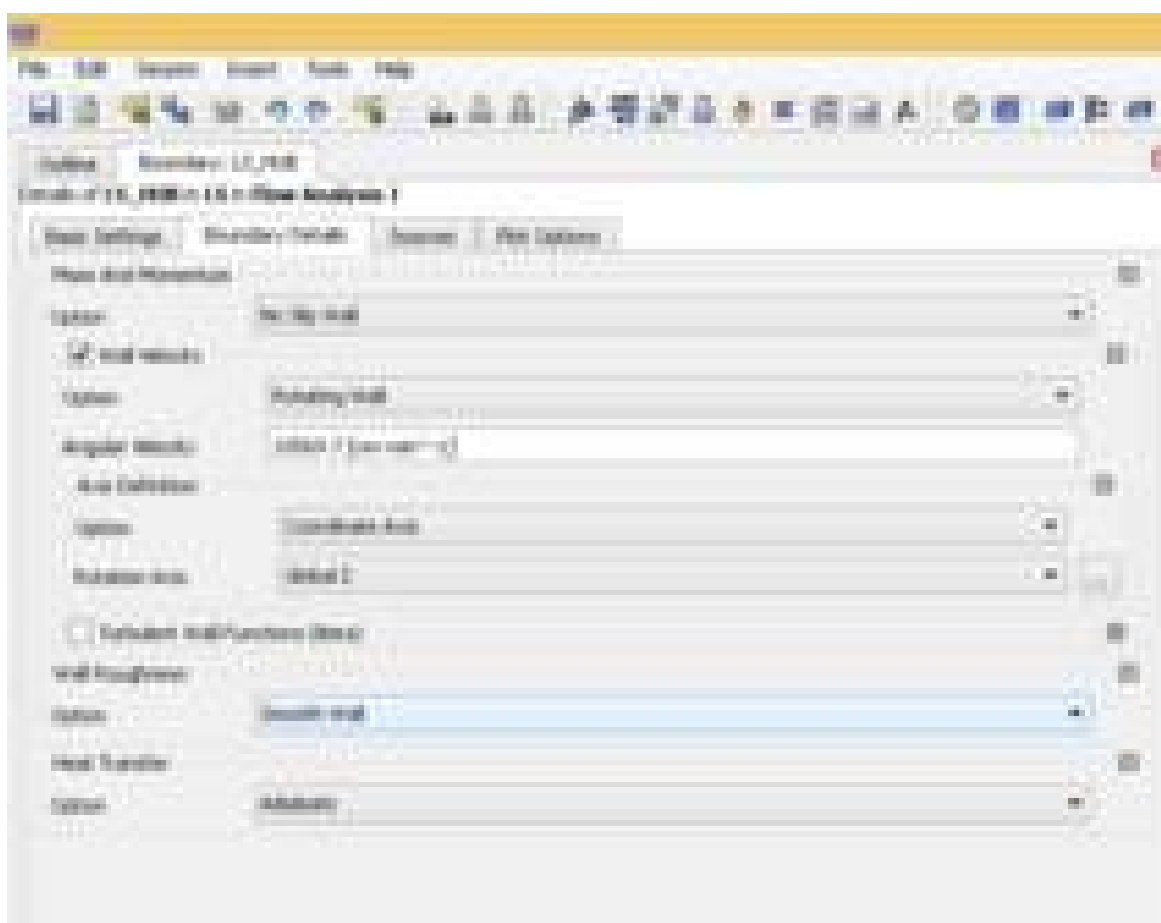


Рис.3.3.7. Boundary Details для LS_HUB.

Для LS_IN задавали давление 155592 паскалей и радиальную составляющую и составляющую тета угла, это -0,2133 и 0.977 соответственно. Так же приняли температуру, которая равна 341,47 Кельвин.

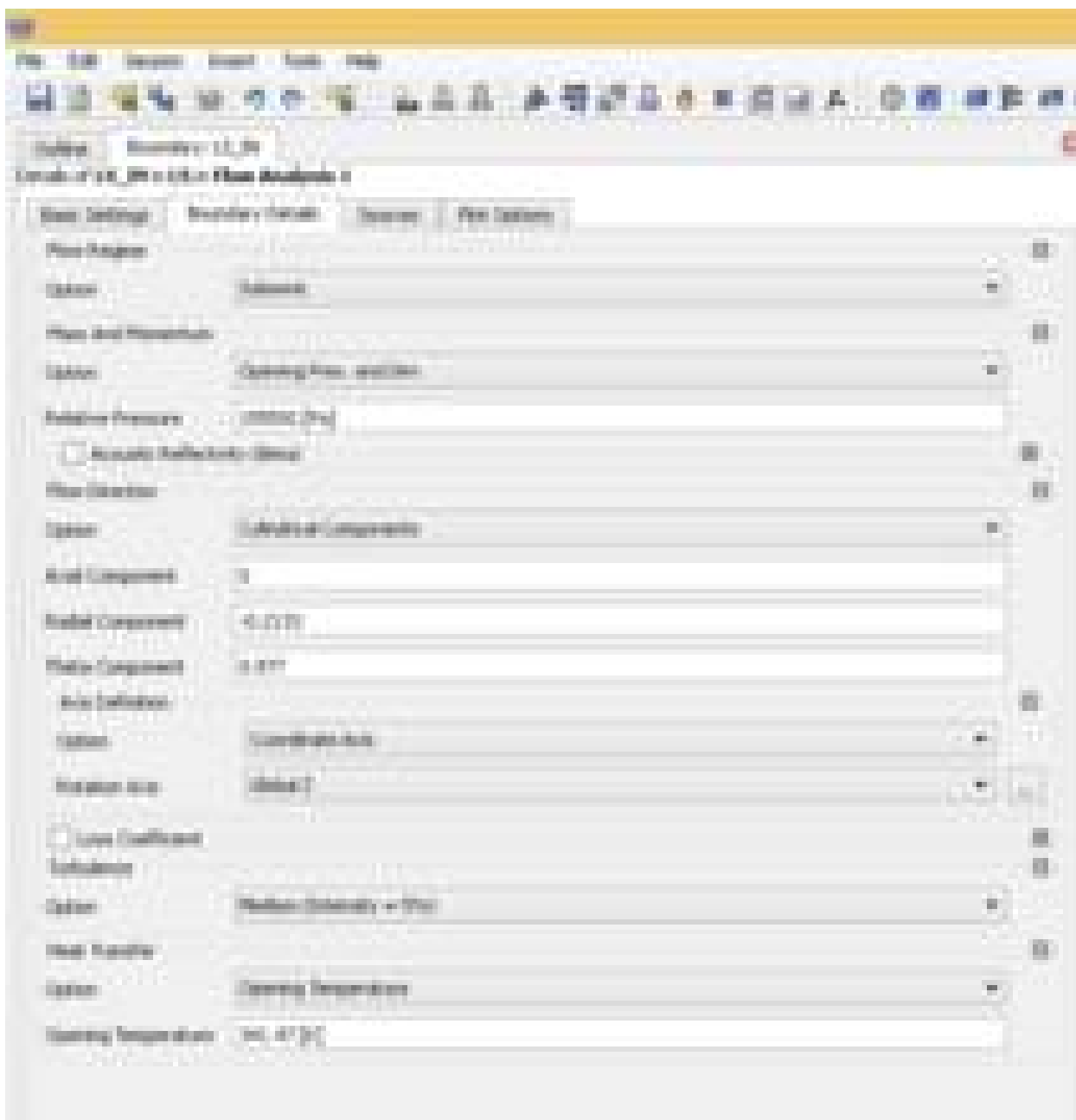


Рис.3.3.8. Boundary Details для LS_HUB.

Для грани, которая называется LS_OUT принимали давление равное 96441.1 Па.

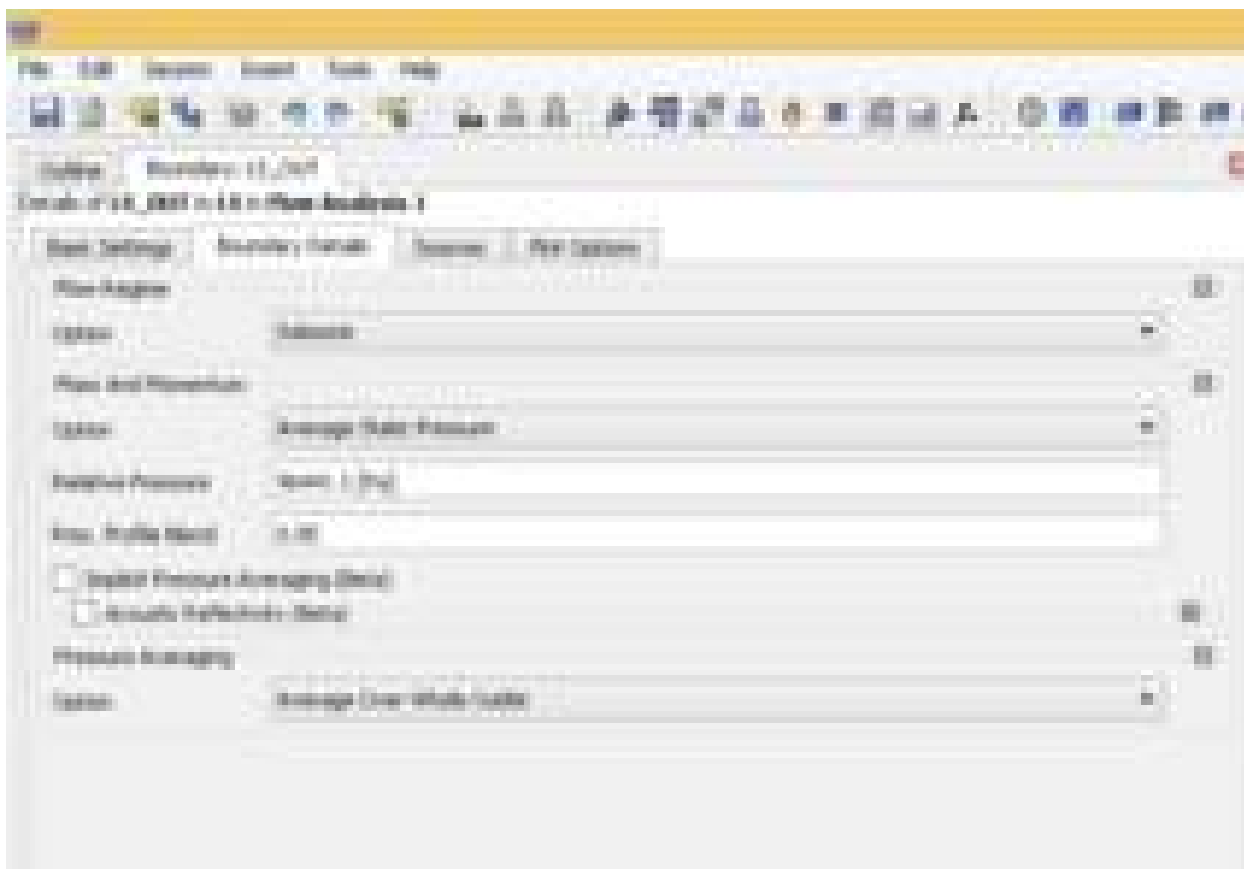


Рис.3.3.9. Boundary Details для LS_OUT.

Для всей поверхности, которая называется LS во вкладке Fluid Models задавалась модель турбулентности потока. Изначально все расчеты производили на модели, которая называется SST (Shear Stress Transport).

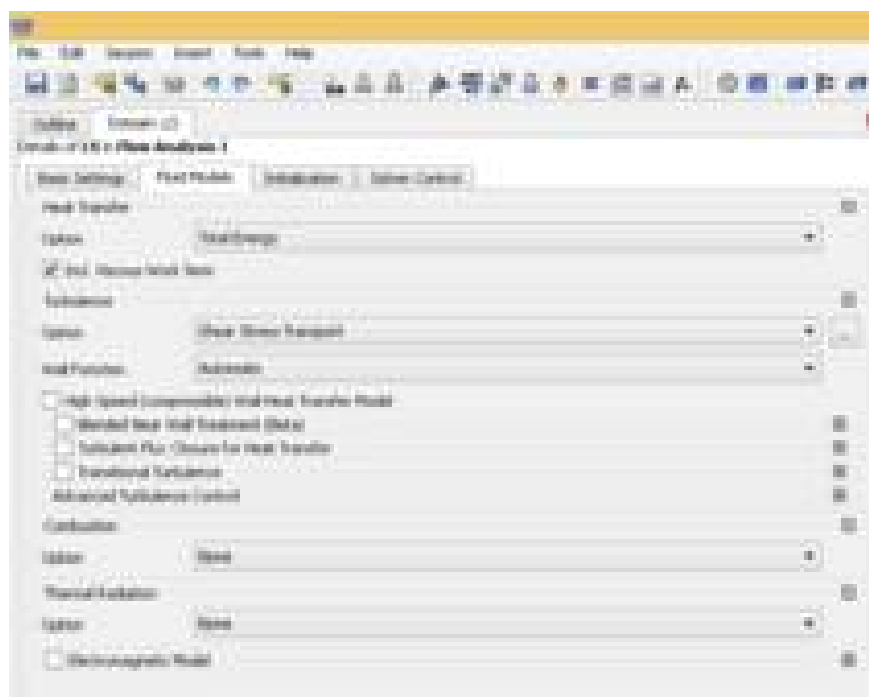


Рис.3.3.10. Выбор модели турбулентности.

В CFX-Pre имеется такая вкладка, которая называется Solver control (рисунок 3.3.11.), находится по такому пути: Simulation – Flow Analysis 1 – LS – Solver control. В данной вкладке задавалось количество итераций, минимальное и максимальное значение. Итерация – это организация обработки данных, при которой действия повторяются многократно и при этом не приводя к вызовам самих себя. В данной работе использовалось двести итераций, этого было достаточно для проведения довольно точного расчёта. Так же устанавливали такую величину как Timescale Factor. Timescale Factor – это параметр, который позволяет регулировать учёт нестационарных явлений при моделировании задачи. Большие значения уменьшают учёт нестационарности, а меньшие наоборот увеличиваются. Значение Timescale Factor нужно выбрать таким образом, чтобы расчёт не прекратился по причине ошибки и чтобы расчёт сошёлся. В данной задаче использовались разные значения Timescale Factor, 10-20. Бывало так, что расчёт начинался со значением 10 и в процессе решения оно менялось на 25 или 30, CFX-Post (об этом подмодуле немного позже) позволяет это делать.

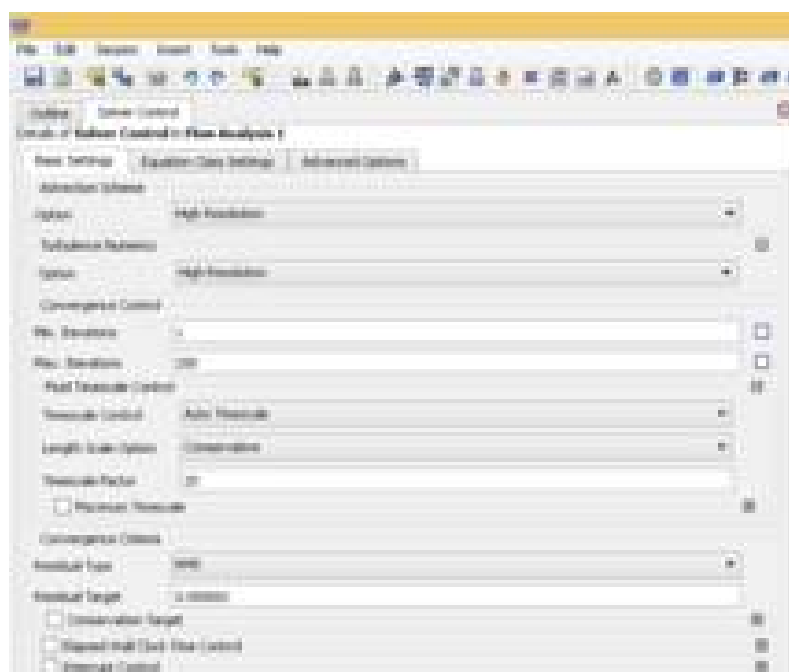


Рис.3.3.11. Выбор количества итераций и Timescale Factor

Заключительным подмодулем программы CFX является CFX-Post. CFX-Post – это программа, которая предназначена для визуализации и анализа полученных результатов расчёта, который в свою очередь был проведен в CFX Solver ранее. На рисунке 3.3.12. показан интерфейс программы CFX-Post.

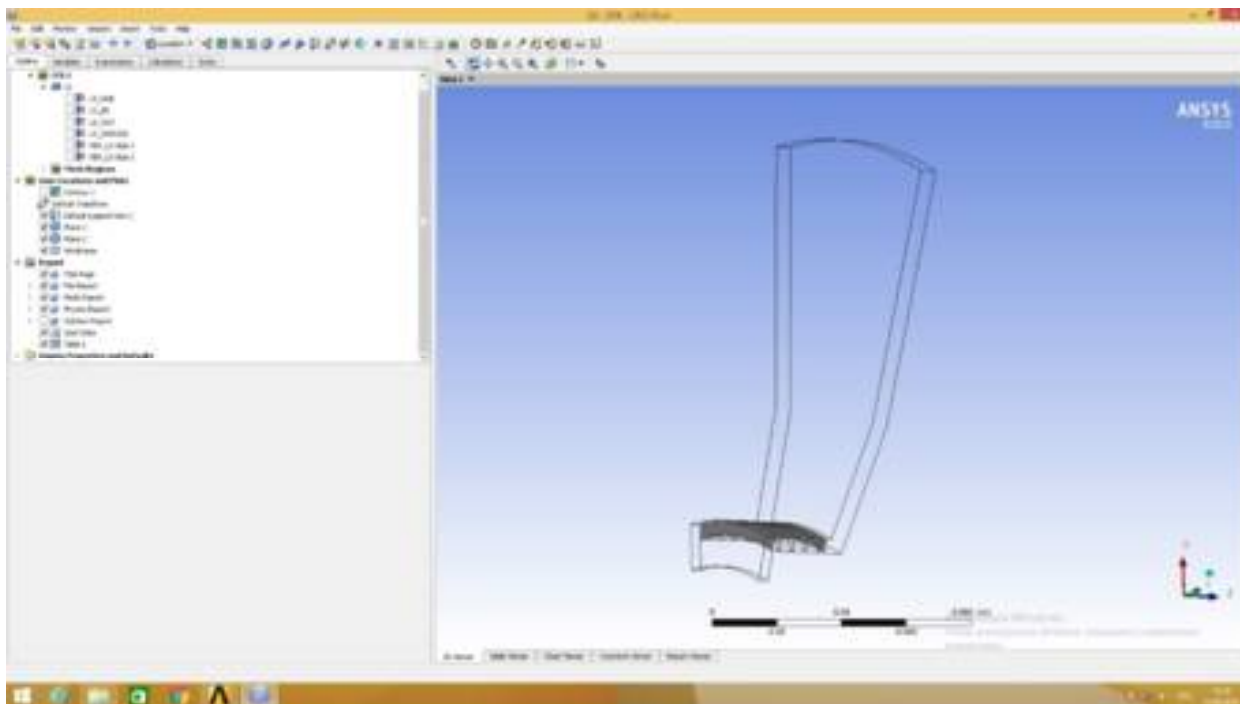


Рис. 3.3.12. Интерфейс программы CFX-Post.

С помощью данного подмодуля для последующего анализа и обработки были взяты данные следующих параметров:

P^* – полное давление [Па];

P – статическое давление [Па];

T^* – полная температура [К];

T – статическая температура [К];

m – массовый расход [кг/с];

C – абсолютная скорость [м/с];

ρ – плотность [кг/м³];

Для того, чтобы получить численные значения этих параметров необходимо в CFX-Post нажать на значок “Table” и там ввести формулы,

используя такие вкладки как: “Function”, “Variable”, “Location”. Формулы выглядят так:

$P^* = \text{massFlowAveAbs(Total Pressure)}@[Локация]$.

$P = \text{areaAve(Pressure)}@[Локация]$.

$T^* = \text{massFlowAveAbs(Total Temperature)}@[Локация]$.

$T = \text{massFlowAveAbs(Temperature)}@[Локация]$.

$m = \text{massFlow()}@[Локация]$.

$\rho = \text{massFlowAve(Density)}@[Локация]$.

На рисунке 3.3.13. показано как в самой программе выглядят полученные данные:

	P	P*	T	T*	m	rho
plane 1	10070.00	10070.00	293.15	293.15	0.000000	1.2048
plane 2	10070.00	10070.00	293.15	293.15	0.000000	1.2048

Рис.3.3.13. Полученные данные после расчета.

И для того, чтобы данные отображались в привычном виде необходимо выделить все результаты нажать иконку “Number Formatting” в выпадающем меню выбрать “Fixed”, указать нужное количество знаков после запятой и снять галочку с пункта “Show Units”.

4. Моделирование и анализ результатов

В начале работы было принято решение построить четыре сетки с различным количеством узлов в зазоре (N_s), но с одинаковым значением сгущения (S_1, S_2) и коэффициента расширения (r_1, r_2). Все дальнейшие расчеты

Итак, были взяты следующие параметры:

1 сетка: $N_s=6$, $S_1=S_2=0.05$ мм, $r_1=r_2=1.3$;

2 сетка: $N_s=10$, $S_1=S_2=0.05$ мм, $r_1=r_2=1.3$;

3 сетка: $N_s=12$, $S_1=S_2=0.05$ мм, $r_1=r_2=1.3$;

4 сетка: $N_s=16$, $S_1=S_2=0.05$ мм, $r_1=r_2=1.3$;

Сначала снимали данные со входа (Inlet) и выхода (Outlet) лабиринтного уплотнения, затем было принято снимать показания с plane 1 и plane 2, это плоскости, которые находятся на некотором расстоянии от входа и выхода с лабиринтного уплотнения, там показания более точные и далее для сравнения использовались именно они. Ниже на рисунке 4.1 показано где располагаются plane 1 и plane 2.

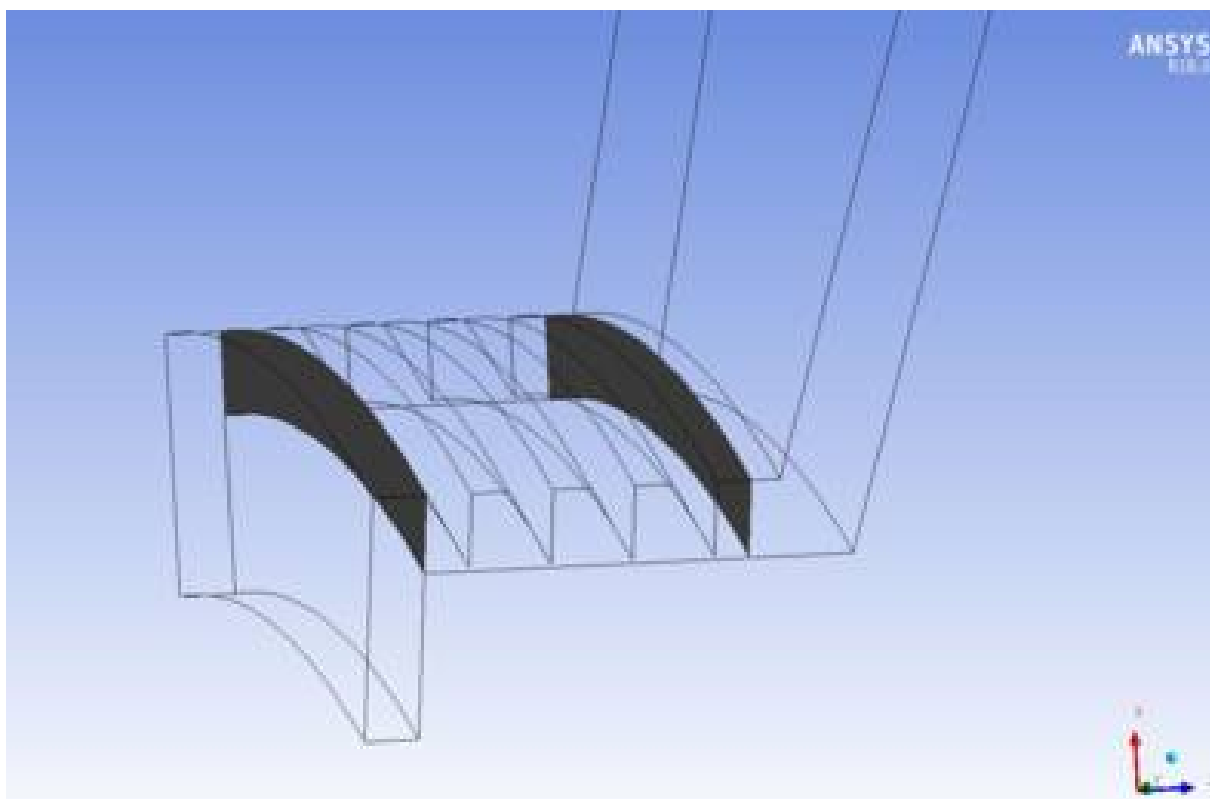


Рис.4.1. Расположение plane 1 и plane 2.

Результаты расчетов лабиринтного уплотнения с разным количеством узлов в зазоре представлены ниже в таблице 4.1.

Табл.4.1. Результаты расчетов лабиринтного уплотнения при $N_s=6,10,12,16$.

Ns=6							
	P*	P	T*	T	C	m	ρ
in	159890.00	155558.00	350.55	347.77	62.92	0.002123	1.6289
out	100043.00	96683.90	374.86	371.22	85.28	-0.002123	0.9072
plane 1	150473.00	145728.00	372.20	368.81	80.92	0.002122	1.3782
plane 2	102537.00	96580.00	373.43	367.28	101.25	0.002122	0.9328
Ns=10							
in	159903.00	155558.00	350.60	347.82	63.03	0.002107	1.6295
out	98623.90	95043.10	375.12	371.17	88.64	-0.002107	0.8919
plane 1	150463.00	145748.00	372.37	369.00	80.67	0.002107	1.3777
plane 2	101177.00	95185.30	373.65	367.38	101.86	0.002106	0.9196
Ns=12							
in	159915.00	155558.00	350.66	347.87	63.12	0.002090	1.6303
out	100129.00	96704.10	376.05	372.32	86.22	-0.002097	0.9047
plane 1	150464.00	145782.00	373.14	369.79	80.46	0.002090	1.3750
plane 2	102509.00	96589.50	374.56	368.43	100.82	0.002090	0.9299
Ns=16							
in	159930.00	155558.00	350.72	347.92	63.24	0.002072	1.6311
out	100097.00	96380.70	376.25	372.21	89.68	-0.002073	0.9019
plane 1	150454.00	145807.00	373.32	369.99	80.18	0.002072	1.3745
plane 2	102558.00	96380.70	374.76	368.67	100.41	0.002072	0.9300

После того, как были произведены расчеты и проанализированы результаты, было принято решение продолжать расчет, используя сетку, в которой количество узлов в зазоре равно 10.

Все расчеты производились при следующих начальных данных:

$P^*=155592$ Па – полное давление на входе;

$T^*=341.47$ К – полная температура на входе;

$\text{Sin}(\alpha)=0.2133$;

$\text{Cos}(\alpha)=0.977$;

$P=96441.1$ Па – статическое давление на выходе;

Следующим шагом были проведены расчеты, как уже говорилось ранее, с сеткой в которой количество узлов в зазоре равняется 10, но уже изменялись другие параметры такие как: количество узлов N , сгущение S_1, S_2 и коэффициент расширения r_1, r_2 . В работе меняли значение коэффициента расширения и значения сгущения, а количество узлов выбирали исходя из значения коэффициента расширения. Всего было проведено 16 расчётов, так как $r_1, r_2=1.2, 1.3, 1.4, 1.5$ мм, а $S_1, S_2=0.005, 0.01, 0.05, 0.1$ мм. Для данных сеток снимались те же показания, что и для сеток, когда меняли количество узлов в зазоре, а именно: полное давление P^* , статическое давление P , полная температура T^* , статическая температура T , массовый расход m , абсолютная скорость C и плотность ρ . Данные снимались как со входа (Inlet) и выхода (Outlet) лабиринтного уплотнения, вернее его сектора, так и с плоскостей $plan 1$ и $plane 2$. Результаты расчетов показаны ниже в таблицах 4.2-4.16.

Таблица 4.2. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.005$ мм; $r_1, r_2=1.2$ мм.

(0.005; 1.2)				
	in	out	plane 1	plane 2
p^*	160038.00	99775.20	150382.00	101925.00
p	155560.00	96510.70	146092.00	96460.00
t^*	351.22	378.55	375.13	376.83
t	348.35	374.97	372.05	371.12
c	64.14	84.34	77.19	97.38
m	0,02787	-0,02787	0,02787	0,02787
ρ	1.6417	0.8965	1.3691	0.9274

Таблица 4.3. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.005$ мм; $r_1, r_2=1.3$ мм.

(0.005; 1.3)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	160053.00	99770.30	150374.00	102026.00
p	155560.00	351.32	146090.00	96526.70
t*	351.32	378.81	375.38	377.15
t	348.43	375.26	372.30	371.41
c	64.27	83.94	77.19	97.17
m	0,027915	-0,02792	0,027915	0,027915
ρ	1.6414	0.8960	1.3684	0.9267

Таблица 4.4. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.005$ мм; $r_1, r_2=1.4$ мм.

(0.005; 1.4)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	160058.00	99741.90	150387.00	102170.00
p	155560.00	96548.80	146094.00	96575.70
t*	351.39	378.92	375.50	377.34
t	348.50	375.41	372.41	371.50
c	64.31	83.46	77.31	97.35
m	0,02799	-0,02799	0,02799	0,02799
ρ	1.6410	0.8958	1.3680	0.9262

Таблица 4.5. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.005$ мм; $r_1, r_2=1.5$ мм.

(0.005; 1.5)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	160069.00	99692.80	150370.00	102279.00
p	155560.00	96552.50	146091.00	96607.60
t*	351.45	379.01	375.60	377.48
t	348.55	375.56	372.52	371.57
c	64.44	82.80	77.18	97.60
m	0,028065	-0,02807	0,028065	0,028065
ρ	1.6406	0.8955	1.3675	0.9259

Таблица 4.6. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.01$ мм; $r_1, r_2=1.2$ мм.

(0.01; 1.2)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	160202.00	99705.90	150283.00	101837.00
p	155559.00	96521.40	146028.00	96445.20
t*	351.52	379.51	376.03	377.80
t	348.54	376.00	372.96	372.14
c	65.40	83.43	77.00	97.37
m	0,027915	-0,02792	0,027915	0,027915
ρ	1.6431	0.8941	1.3654	0.9240

Таблица 4.7. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.01$ мм; $r_1, r_2=1.3$ мм.

(0.01; 1.3)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	160185.00	99689.30	150274.00	101944.00
p	155558.00	96531.90	146028.00	96498.50
t*	351.52	379.42	375.98	377.79
t	348.55	375.95	372.92	372.08
c	65.28	83.06	76.94	97.12
m	0,028005	-0,02801	0,028005	0,028005
ρ	1.6423	0.8943	1.3652	0.9238

Таблица 4.8. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.01$ мм; $r_1, r_2=1.4$ мм.

(0.01; 1.4)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	160176.00	99679.20	150293.00	102073.00
p	155559.00	96548.90	146030.00	96561.50
t*	351.61	379.69	376.25	378.11
t	348.64	376.25	373.17	372.34
c	65.30	82.74	77.14	97.33
m	0,028065	-0,02807	0,028065	0,028065
ρ	1.6418	0.8938	1.3646	0.9233

Таблица 4.9. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.01$ мм; $r_1, r_2=1.5$ мм.

(0.01; 1.5)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	160229.00	99643.40	150285.00	102240.00
p	155558.00	96548.30	146040.00	96605.20
t*	351.65	379.52	376.11	378.01
t	348.65	376.12	373.05	372.13
c	65.69	82.26	77.01	97.65
m	0,028215	-0,02822	0,028215	0,028215
ρ	1.6417	0.8941	1.3654	0.9235

Таблица 4.10. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.05$ мм; $r_1, r_2=1.2$ мм.

(0.05; 1.2)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	159571	101125	150492	102576
p	155558	96330	145617	96650,2
t*	350,09	378,44	375,56	376,94
t	347,52	374,28	372,05	370,76
c	61,16	90,84	82,67	101,61
m	0,03156	-0,03156	0,03156	0,03156
ρ	1,6249	0,8964	1,3645	0,9255

Таблица 4.11. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.05$ мм; $r_1, r_2=1.3$ мм.

(0.05; 1.3)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	159533	100134	150494	102565
p	155558	96689,1	145600	96599,9
t*	350,05	378,37	375,53	376,91
t	347,5	374,6	372	370,69
c	60,84	86,74	82,85	101,6
m	0,031665	-0,03182	0,031665	0,031665
ρ	1,624	0,899	1,3644	0,9248

Таблица 4.12. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.05$ мм; $r_1, r_2=1.4$ мм.

(0.05; 1.4)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	159568	100106	150504	102669
p	155558	96669,7	145605	96653,6
t*	350,17	378,41	375,57	377,01
t	347,59	374,65	372,04	370,75
c	61,21	86,66	82,87	101,76
m	0,03171	-0,03189	0,03171	0,03171
ρ	1,6239	0,8987	1,3645	0,9248

Таблица 4.13. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.05$ мм; $r_1, r_2=1.5$ мм.

(0.05; 1.5)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	159530	100083	150521	102908
p	155558	96636	150521	102908
t*	350,05	378,39	375,56	377,05
t	347,5	374,62	372,02	370,61
c	60,79	86,82	83,03	102,89
m	0,03177	-0,03188	0,038124	0,038124
ρ	1,6236	0,8985	1,3645	0,9248

Таблица 4.14. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.1$ мм; $r_1, r_2=1.2$ мм.

(0.1; 1.2)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	159045.00	100725.00	150977.00	103097.00
p	155558.00	96773.00	145081.00	96565.10
t*	348.75	375.19	373.05	373.86
t	346.52	370.92	368.83	367.14
c	57.30	92.46	91.01	106.16
m	0,03591	-0,03591	0,03591	0,03591
ρ	1.6114	0.9087	1.3712	0.9321

Таблица 4.15. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.1$ мм; $r_1, r_2=1.3$ мм.

(0.1; 1.3)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	159028.00	100694.00	150980.00	103076.00
p	155558.00	96769.20	145078.00	96574.60
t*	348.73	375.14	373.02	373.83
t	346.51	370.90	368.80	367.13
c	57.18	92.15	91.05	105.97
m	0,035895	-0,0359	0,035895	0,035895
ρ	1.6113	0.9087	1.3714	0.9320

Таблица 4.16. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.1$ мм; $r_1, r_2=1.4$ мм.

(0.1; 1.4)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	158991.00	100683.00	150998.00	103355.00
p	155558.00	96306.30	145044.00	96768.60
t*	348.63	375.14	372.99	373.86
t	346.44	370.40	368.73	367.09
c	56.89	97.05	91.45	106.65
m	0,036315	-0,03632	0,036315	0,036315
ρ	1.6104	0.9056	1.3714	0.9340

Таблица 4.16. Результаты расчёта для $S_1, S_2=0.1$ мм; $r_1, r_2=1.5$ мм.

(0.1; 1.5)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	158973.00	100689.00	151015.00	103182.00
p	155558.00	96734.30	145019.00	96601.50
t*	348.59	374.15	372.18	372.85
t	346.41	369.89	367.90	366.09
c	56.77	92.39	91.68	106.55
m	0,03645	-0,03645	0,03645	0,03645
ρ	1.6100	0.9109	1.3741	0.9346

При расчёте проверялась сходимость задачи. Эта сходимость проверяется по кривым N-Energy Imbalance и P-Mass Imbalance, погрешность должна быть не более 0.05 %. На рисунке 4.2 представлен пример сходимости задачи для случая в котором $S_1, S_2=0.005$ $r_1, r_2=1.2$ мм. В данном примере погрешность для N-Energy Imbalance (красная линия) составляет 0.009 %, а для P-Mass Imbalance (зелёная линия) – 0.013 %.

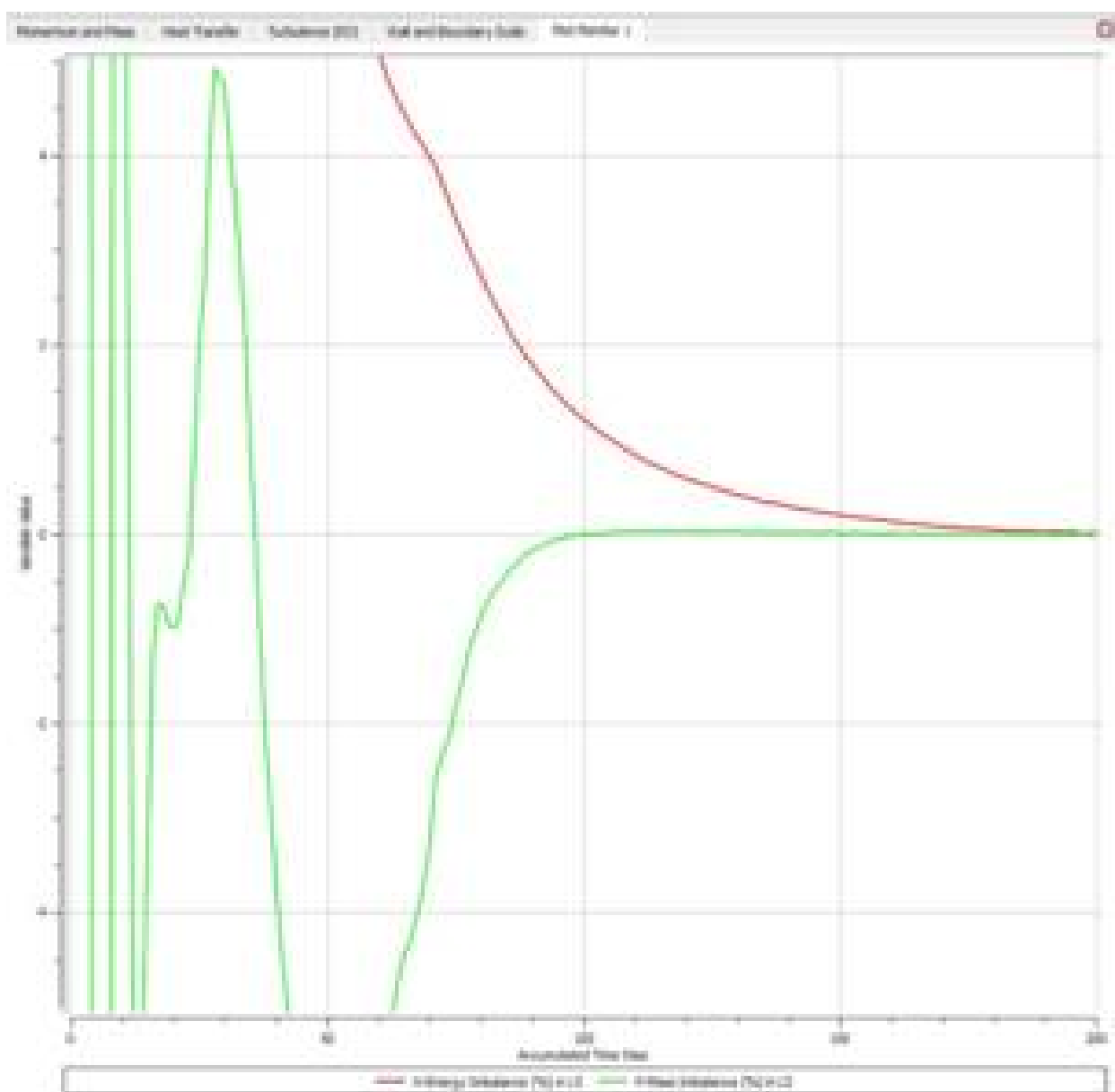


Рис.4.2. Сходимость задачи для $S_1, S_2=0.005$ $r_1, r_2=1.2$ мм.

Далее для наглядного сравнения и анализа полученных данных при расчёте сеток с разными параметрами было решено построить несколько графиков с разными зависимостями. Первый график – это зависимость коэффициента расширения γ от коэффициента расхода лабиринтного уплотнения $\alpha_{л}$. Второй график – это зависимость размера пристеночного слоя S от коэффициента расхода лабиринтного уплотнения $\alpha_{л}$.

Чтобы построить эти графики необходимо было найти коэффициент расхода лабиринтного уплотнения $\alpha_{л}$, он находится по следующей формуле:

$$\alpha_{л} = \frac{m}{\pi \cdot D_{л} \cdot s_r \cdot \rho_{л} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{z_{л} \cdot \rho_{л}}}},$$

где m – массовый расход; $D_{л}$ – средний диаметр уплотнения; s_r – радиальный зазор в уплотнении; $\rho_{л}$ – средняя плотность газа в уплотнении; ΔP – перепад давлений.

Исходные данные для расчета $\alpha_{л}$ ниже в таблицах 4.17-4.20.

Таблица 4.17. Данные для расчета $\alpha_{л}$ при различном γ и $S=0.005$ мм.

0,005;1,2		0,005;1,3		0,005;1,4		0,005;1,5	
ρ_1	0,9328	ρ_1	0,9196	ρ_1	0,9299	ρ_1	0,93
ρ_2	1,3782	ρ_2	1,3777	ρ_2	1,375	ρ_2	1,3745
$\rho_{л}$	1,1555	$\rho_{л}$	1,14865	$\rho_{л}$	1,15245	$\rho_{л}$	1,15225
s_r	0,00025	s_r	0,00025	s_r	0,00025	s_r	0,00025
m	0,02787	m	0,027915	m	0,02799	m	0,028065
$D_{л}$	0,2485	$D_{л}$	0,2485	$D_{л}$	0,2485	$D_{л}$	0,2485
P_2	146092	P_2	146090	P_2	146094	P_2	146091
P_1	96460	P_1	96526	P_1	96575,7	P_1	96607,6
ΔP	49632	ΔP	49564	ΔP	49518,3	ΔP	49483,4
$\alpha_{л}$	0,843	$\alpha_{л}$	0,848	$\alpha_{л}$	0,849	$\alpha_{л}$	0,852

Таблица 4.18. Данные для расчета $\alpha_{л}$ при различном r и $S=0,01$ мм.

0,01;1,2		0,01;1,3		0,01;1,4		0,01;1,5	
ρ_1	0,9328	ρ_1	0,9196	ρ_1	0,9299	ρ_1	0,93
ρ_2	1,3782	ρ_2	1,3777	ρ_2	1,375	ρ_2	1,3745
$\rho_{л}$	1,1555	$\rho_{л}$	1,14865	$\rho_{л}$	1,15245	$\rho_{л}$	1,15225
sr	0,00025	sr	0,00025	sr	0,00025	sr	0,00025
m	0,027915	m	0,028005	m	0,028065	m	0,028215
Dл	0,2485	Dл	0,2485	Dл	0,2485	Dл	0,2485
P2	146028	P2	146028	P2	146030	P2	146040
P1	96445,2	P1	96498,5	P1	96561,5	P1	96605,2
ΔP	49582,8	ΔP	49529,5	ΔP	49468,5	ΔP	49434,8
$\alpha_{л}$	0,845	$\alpha_{л}$	0,851	$\alpha_{л}$	0,852	$\alpha_{л}$	0,857

Таблица 4.19. Данные для расчета $\alpha_{л}$ при различном r и $S=0,05$ мм.

0,05;1,2		0,05;1,3		0,05;1,4		0,05;1,5	
ρ_1	0,9328	ρ_1	0,9196	ρ_1	0,9299	ρ_1	0,93
ρ_2	1,3782	ρ_2	1,3777	ρ_2	1,375	ρ_2	1,3745
$\rho_{л}$	1,1555	$\rho_{л}$	1,14865	$\rho_{л}$	1,15245	$\rho_{л}$	1,15225
sr	0,00025	sr	0,00025	sr	0,00025	sr	0,00025
m	0,03156	m	0,031665	m	0,03171	m	0,038124
Dл	0,2485	Dл	0,2485	Dл	0,2485	Dл	0,2485
P2	145617	P2	145600	P2	145605	P2	150521
P1	96650,2	P1	96599,9	P1	96653,6	P1	102908
ΔP	48966,8	ΔP	49000,1	ΔP	48951,4	ΔP	47613
$\alpha_{л}$	0,961	$\alpha_{л}$	0,967	$\alpha_{л}$	0,967	$\alpha_{л}$	1,179

Таблица 4.20. Данные для расчета $\alpha_{л}$ при различном r и $S=0,1$ мм.

0,1;1,2		0,1;1,3		0,1;1,4		0,1;1,5	
ρ_1	0,9328	ρ_1	0,9196	ρ_1	0,9299	ρ_1	0,93
ρ_2	1,3782	ρ_2	1,3777	ρ_2	1,375	ρ_2	1,3745
$\rho_{л}$	1,1555	$\rho_{л}$	1,14865	$\rho_{л}$	1,15245	$\rho_{л}$	1,15225
s_r	0,00025	s_r	0,00025	s_r	0,00025	s_r	0,00025
m	0,03591	m	0,035895	m	0,036315	m	0,036450
$D_{л}$	0,2485	$D_{л}$	0,2485	$D_{л}$	0,2485	$D_{л}$	0,2485
P_2	145081	P_2	145078	P_2	145044	P_2	145019
P_1	96565,1	P_1	96574,6	P_1	96768,6	P_1	96601,5
ΔP	48515,9	ΔP	48503,4	ΔP	48275,4	ΔP	48417,5
$\alpha_{л}$	1,099	$\alpha_{л}$	1,102	$\alpha_{л}$	1,116	$\alpha_{л}$	1,118

С помощью полученных данных были построены два графика:

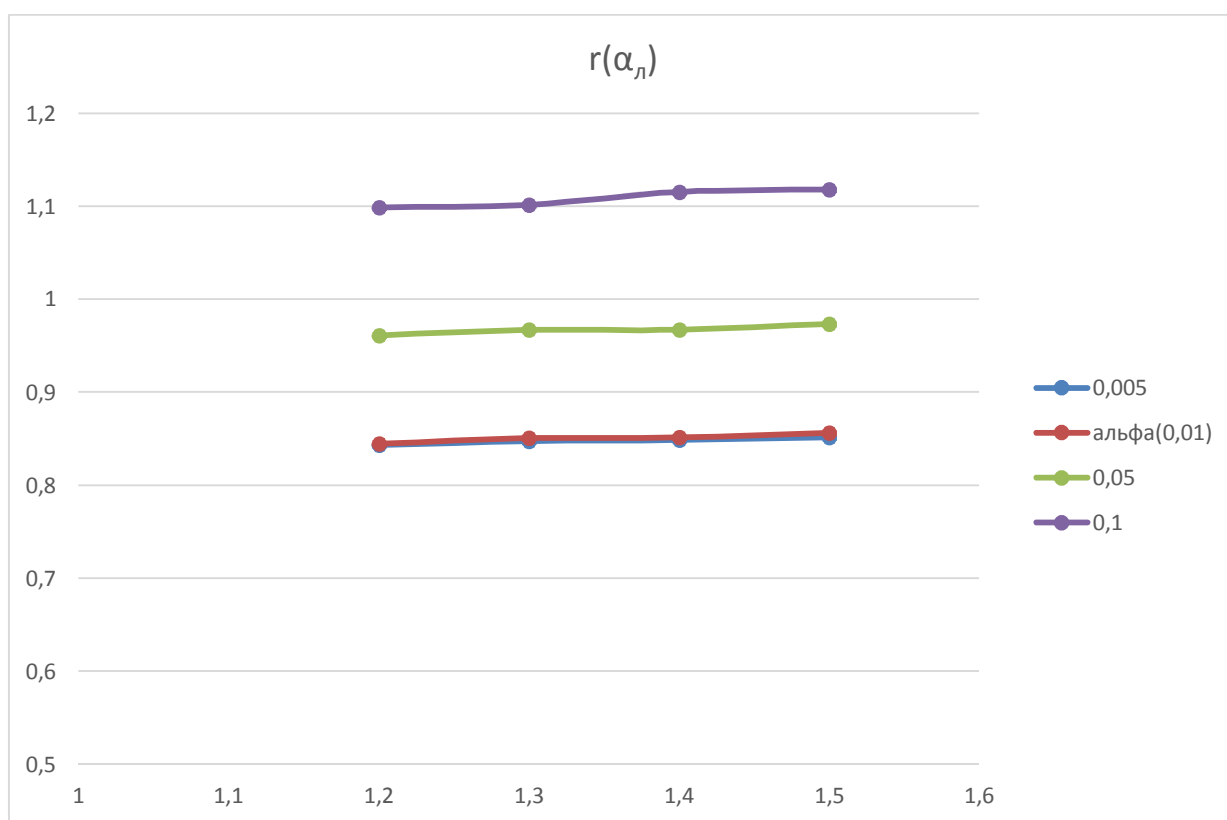


График 4.1. Зависимость $r(\alpha_{л})$

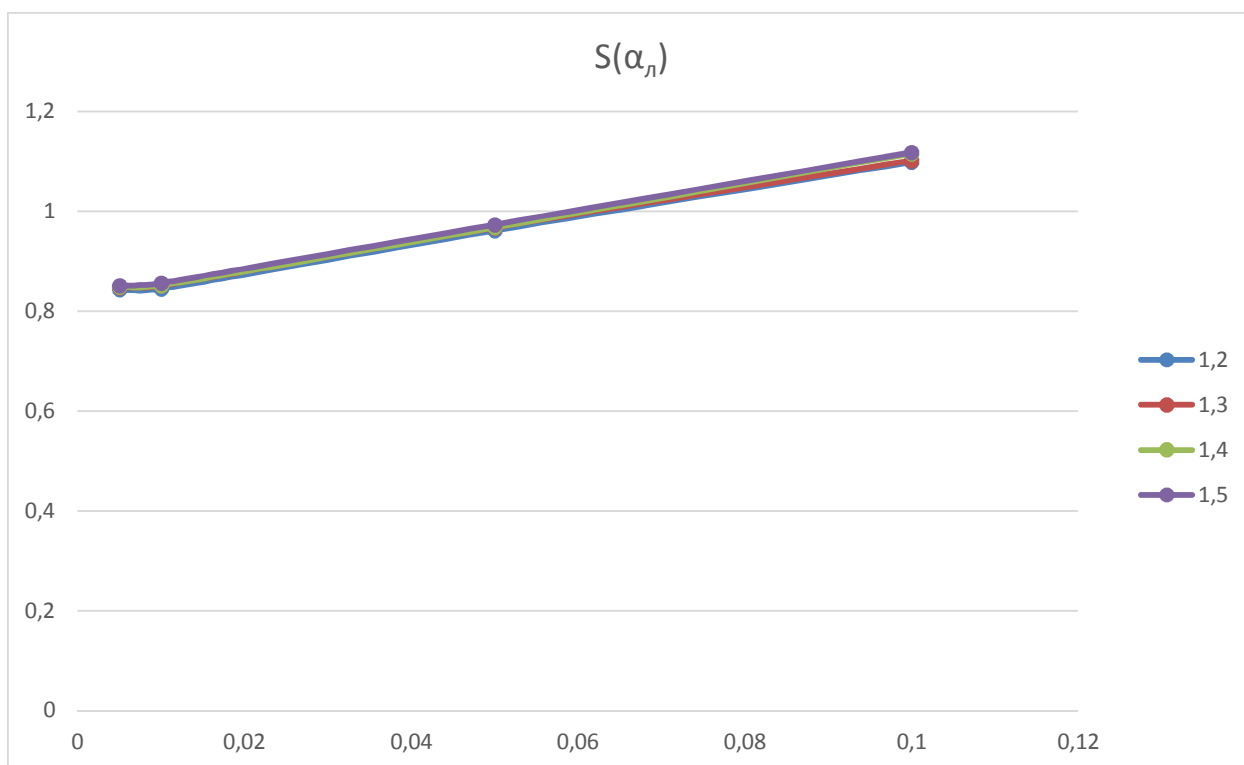


График 4.2. Зависимость $S(\alpha_l)$

На графике 4.1 видно, что при изменении размера пограничного слоя с 0.005 мм на 0.01 мм результат очень схож, так как прямые накладываются друг на друга, соответственно можно сделать вывод, что в данном случае мы добились сеточной независимости, чего и добивались. Остальные две прямые отличаются по результатам, соответственно эти решения нам не подходят.

Что касается графика 4.2., то на нем видно, что при варьировании коэффициента расширения результат практически не изменяется.

Далее были построены ещё два графика для полноты картины результатов вычислений. Первый график – это зависимость коэффициента расширения γ от перепада давлений ΔP . Второй график – это зависимость размера пристеночного слоя S от перепада давлений ΔP .

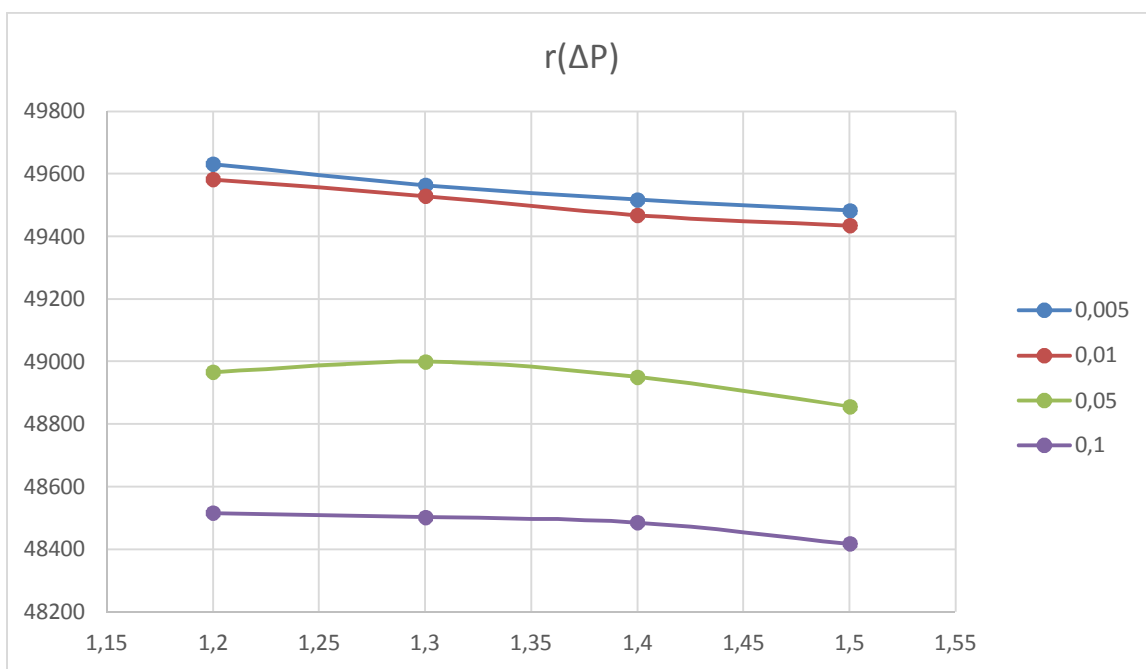


График 4.3. Зависимость $r(\Delta P)$.

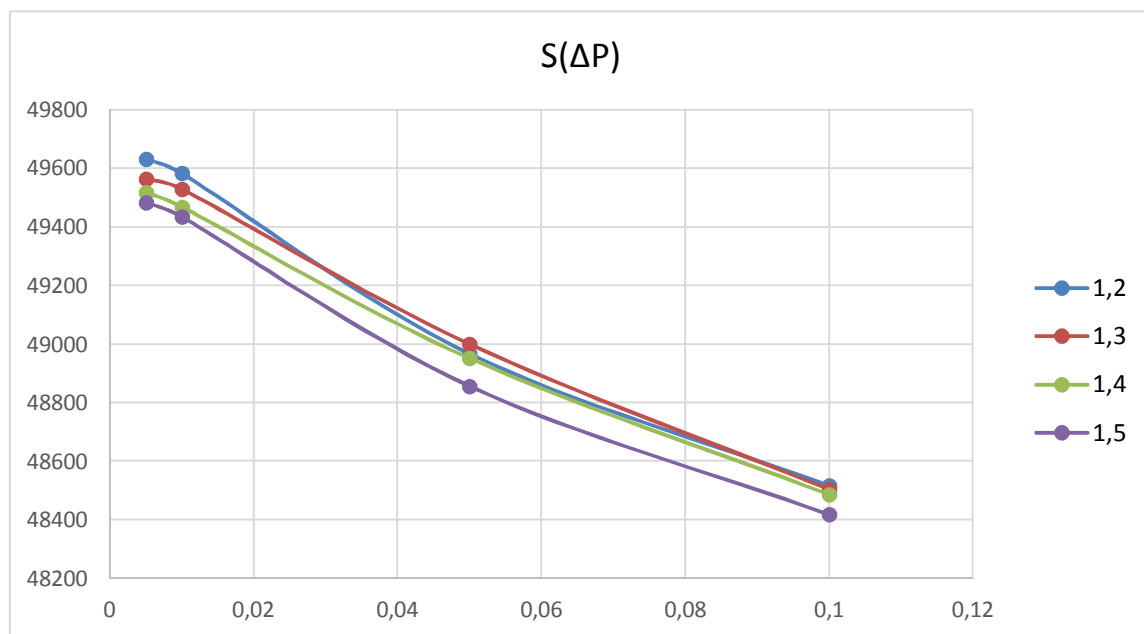


График 4.4. Зависимость $S(\Delta P)$.

Следующим шагом было решено исследовать насколько влияют различные модели турбулентности на результат. Рассматривалось три модели турбулентности: k- ω , SST (Shear Stress Transport) и SA (Spalart Allmaras).

Модель турбулентности k- ω использует такие параметры как турбулентная кинематическая энергия k и величина ω ; k- ω достаточно хорошо может описать пристеночные течения, но для свободных течений данная модель не является достаточно удобной, следовательно, в данной области этот метод имеет низкую точность решений.

Модель турбулентности SST (Shear Stress Transport) содержит в себе две модели k- ω и k- ϵ . Вблизи стенок для расчета используется модель k- ω , а для расчёта в свободном потоке модель k- ϵ . Полученные результаты, как показывает практика, достаточно хорошо сходятся с экспериментальными данными.

Модель турбулентности SA (Spalart Allmaras) зарекомендовала себя довольно устойчивой моделью, обладающей хорошей сходимостью. Она описывает полностью всю область течения, в том числе и пристеночные слои. Не требует высокой плотности сетки.

Расчеты проводились для сеток с параметрами S=0.01 мм; r=1.4 мм и S=0.005мм; r=1.4 мм. Результаты расчетов приведены ниже в таблицах 4.21-2.25 .

Таблица 4.21. Результаты расчета для SST при S=0.01 мм; r=1.4 мм.

SST(0.01; 1.4)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	160176.00	99679.20	150293.00	102073.00
p	155559.00	96548.90	146030	96561,5
t*	351.61	379.69	376.25	378.11
t	348.64	376.25	373.17	372.34
c	65.30	82.74	77.14	97.33
m	0,028065	-0,02807	0,028065	0,028065
ρ	1.6418	0.8938	1.3646	0.9233

Таблица 4.22. Результаты расчета для k- ω при S=0.01 мм; r=1.4 мм.

k- ω (0.01; 1.4)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	159762.00	99079.20	149926.00	101157.00
p	155568.00	96505.60	146038	96680,4
t*	352.00	386.49	382.31	385.13
t	349.29	383.59	379.46	380.26
c	61.48	75.82	74.14	91.56
m	0,02511	-0,02511	0,02511	0,02511
ρ	1.6311	0.8763	1.3421	0.8987

Таблица 4.22. Результаты расчета для SA при S=0.01 мм; r=1.4 мм.

SA(0.01; 1.4)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	160305.00	99834.70	151795.00	102383.00
p	155555.00	96484.80	147042	96718,8
t*	352.14	364.71	361.89	363.81
t	349.08	361.17	358.62	358.05
c	68.41	84.12	80.35	101.97
m	0,02646	-0,02655	0,02646	0,02646
ρ	1.6577	0.9305	1.4298	0.9563

По результатам расчётов:

Модель турбулентности SST: $\alpha_{\text{л}}= 0,8506$;

Модель турбулентности k- ω : $\alpha_{\text{л}}= 0,7641$;

Модель турбулентности SA: $\alpha_{\text{л}}= 0,7961$;

Таблица 4.23. Результаты расчета для SST при S=0.005 мм; r=1.4 мм.

SST(0.01; 1.4)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	160058.00	99741.90	150387.00	102170.00
p	155560.00	96548.80	146094.00	96575.70
t*	351.39	378.92	375.50	377.34
t	348.50	375.41	372.41	371.50
c	64.31	83.46	77.31	97.35
m	0,02799	-0,02799	0,02799	0,02799
ρ	1.6410	0.8958	1.3680	0.9262

Таблица 4.24. Результаты расчета для k-ω при S=0.005 мм; r=1.4 мм.

k-ω(0.005; 1.4)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	159620.00	99235.50	150006.00	101385.00
p	155569.00	96517.20	146042.00	96706.00
t*	351.63	384.88	380.90	383.49
t	349.02	381.84	378.00	378.45
c	60.23	77.71	74.71	92.52
m	0,025365	-0,02553	0,025365	0,025365
ρ	1.6290	0.8804	1.3473	0.9045

Таблица 4.25. Результаты расчета для SA при S=0.005 мм; r=1.4 мм.

SA(0.01; 1.4)				
	in	out	plane 1	plane 2
p*	161096.00	99113.80	150823.00	101320.00
p	155555.00	96457.20	147179.00	96665.70
t*	354.70	378.26	372.88	377.09
t	351.12	375.33	370.28	372.14
c	73.65	76.32	71.26	93.57
m	0.001638	-0.001640	0.001638	0.001638
ρ	1.6825	0.8951	1.3860	0.9185

По результатам расчётов:

Модель турбулентности SST: $\alpha_{л} = 0,8479$;

Модель турбулентности k- ω : $\alpha_{л} = 0,7721$;

Модель турбулентности SA: $\alpha_{л} = 0,7379$;

Видно, что используя разные модели турбулентности, мы получаем разные значения коэффициента расхода лабиринтного уплотнения. Нельзя точно сказать какой параметр лучше использовать, так как отсутствуют экспериментальные данные.

Заключение.

В результате проведённой работы было просчитано несколько сеток с разными параметрами такими как: коэффициент расширения, количество узлов в зазоре, количество узлов, размер пристеночного слоя, но такие входные данные как давление на входе и выходе, температура и углы входа потока оставались неизменными.

Все расчёты были произведены в программном комплексе ANSYS 18.0. Было рассказано как настроить сетку таким образом, чтобы результаты расчётов оказались довольно точными и приемлемыми для дальнейшего применения. Стоит отметить, что в ходе проведения работы было показано как изменение параметров сетки в некоторых случаях влияет на результат, а в некоторых случаях нет, то есть была достигнута сеточная независимость, чего собственно и добивались в данной работе.

Но не стоит забывать, что на результаты, помимо параметров сетки, влияет и выбор модели турбулентности. Для того, чтобы понять какая модель подходит лучше для использования, следует проводить дальнейшие исследования.

Список используемой литературы

1. <https://www.comsol.ru/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>
2. <http://mech.spbstu.ru/images/b/ba/DiplomBogdanov.pdf>
3. <https://www.ansys.com/>
4. Н.Н. Федорва, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS, Москва 2017.