

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

Работа допущена к защите
Заведующий кафедрой

_____ Ю.В. Кожухов

« ___ » _____ 2019 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА
проектирование дожимного центробежного компрессора попутно
нефтяного газа производительностью 1,8 млн. ст.м³/сутки и отношением
давления $p=1,246$
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
доцент, к.т.н.

Н.И. Садовский

Научный консультант
асс.

А.А. Аксенов

Санкт-Петербург

2019

РЕФЕРАТ

На 41 с., 27 рисунков, 23 таблицы, 0 приложений

Центробежный компрессор, сеточный генератор, лопаточный диффузор, ANSYS CFX, SAPR, газодинамические параметры, массовый расход.

В выпускной квалификационной работе было выполнено сравнение двух методик расчета: расчет по методике К. П. Селезнева, с проверкой в программе SAPR и расчет в программном комплексе ANSYS. Сначала было рассчитано отдельно рабочее колесо для получения геометрических параметров лопаточного диффузора. После расчета всей ступени и сравнения результатов можно сделать вывод, что параметры, полученные методом численного моделирования, расходятся с расчетными на 5-10%.

THE ABSTRACT

41 pages, 27 pictures, 23 tables, 0 appendixes

Centrifugal compressor, grid generator, blade diffuser, ANSYS CFX, SAPR, gas-dynamic parameters, mass flow

In the final qualifying work, two calculation methods were compared: calculated by the method of K. P. Seleznev, checked in the SAPR program and calculated in the ANSYS software package. After calculating the entire stage and comparing the results, can be concluded that the parameters obtained by the method of numerical simulation diverges from the calculated ones by 5-10%.

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	3
Введение	4
ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	6
1.1. Обзор расчета одноступенчатого центробежного компрессора методами вычислительной газодинамики	6
1.2. Описание конструкции проектируемого компрессора.....	10
1.3 Объект исследования	12
1.4 Описание программно-инженерного комплекса ANSYS 18.00.....	12
1.5 Обработка результатов численного моделирования	17
1.6 Описание структуры модели	19
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ	23
2.1. Построение сетки	23
2.2. Задача валидации эксперимента.....	28
2.3 Подбор лопаточного диффузора.....	30
2.4 Расчет всей ступени	33
2.5 Обработка результатов численного моделирования	34
ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ЛОПАТОЧНОГО ДИФФУЗОРА	39
Заключение	50
Список использованной литературы.....	51

ВВЕДЕНИЕ

Компрессоры-очень распространенная техника в современном мире, отрасли в которых она используется очень обширна. Машиностроение-в этой отрасли компрессоры используются для охлаждения инструментов, в качестве воздушной смазки подшипников и направляющих приборов и станков, а также для снабжения сжатым воздухом пневматических машин, в металлургии данная техника предназначена для дутья доменных печей для достижения необходимой температуры. В автомобильной отрасли компрессоры нашли широкое применение, от накачивания воздуха в колеса автомобиля, до нагнетания воздуха в камеру сгорания, при этом существенно повышается мощность и крутящий момент, доступный с самых низких оборотов, не меняя при этом объем двигателя и его габариты, а также не прибегая к увеличению выбросов в окружающую среду. Компрессор применяются для пополнения газом баллонов высокого давления как для медицинских целей, так и для сварки. В железнодорожном транспорте компрессоры обеспечивают работу тормозной системы.

Самой распространённой отраслью безусловно является нефтегазовая. Компрессоры широко применяются во всех отраслях нефтегазовой промышленности. При бурении применяются горизонтальные двухцилиндровые поршневые буровые компрессоры, развивающие давление 15 – 20 МПа, а также горизонтальные двухцилиндровые поршневые цементировочные компрессора с глобоидальной передачей, развивающие давление 32 – 40 МПа. В нефтедобыче для разных целей применяют поршневые компрессора различного строения. Так, для откачки нефти из скважин применяют глубинные штанговые плунжерные компрессора и глубинные бесштанговые плунжерные гидропоршневые компрессора. Для законтурного и внутриконтурного заводнений применяют многоплунжерные вертикальные компрессора. При подземном ремонте скважин находят применение горизонтальные двухцилиндровые поршневые и трехплунжерные

промывочные компрессора. Для деэмульсации нефти в скважинах применяются вертикальные шестиплунжерные дозирочные компрессора. На нефтеперерабатывающих заводах для перекачки холодных и горячих нефтепродуктов также применяют поршневые приводные компрессоры, но наиболее широко применяют паровые прямодействующие поршневые компрессора различных конструкций. На нефтебазах, а также для внутризаводских перекачек на нефте-перерабатывающих заводах применяют горизонтальные приводные двухцилиндровые компрессора. Для перекачки нефти и различных нефтепродуктов по магистральным нефтепроводам применяют приводные горизонтальные трехплунжерные компрессора. Область применения компрессоров непрерывно растет, так как сжатый воздух и газы требуются для ускорения разработки новых месторождений, для искусственного воздействия на пласт, для рациональной эксплуатации газоконденсатных месторождений без потерь конденсата в пласте, для осуществления сбора нефти и газа, для транспортировки газа по трубопроводам от месторождения к потребителям, для осуществления циркуляции газа в установках по извлечению пропан-бутана из попутного нефтяного газа, в установках депарафинизации и деасфальтизации масел и в ряде других случаев.

Задачи, выполненные в ходе работы:

1. Расчет геометрических параметров ступени по входным и выходным параметрам газа при помощи методики НЗЛ и программы SAPRM.
2. Проведение расчета смоделированного устройства в программном комплексе ANSYS Workbench 16.2.
3. Изготовление для лопаточного диффузора маршрутно- и операционно-технологических карт.

ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1. Обзор расчета одноступенчатого дожимного центробежного компрессора методами вычислительной газодинамики

Построенная ступень центробежного компрессора является спроектированным прототипом газоперекачивающего агрегата «Ладога». Газодинамический расчет компрессора проводился в рамках курсовой работы «Проектирование одноступенчатого центробежного нагнетателя природного газа». Расчет проводился по методике Невского Завода Ленина (НЗЛ), также проводилось сопоставление и корректировка итоговых данных с программой SAPRM, созданной на кафедре «Компрессорной вакуумной и холодильной техники», Санкт-Петербургского Политехнического Университета имени Петра Великого. Результаты расчетов приведены в таблицах 1.1-1.4.

Геометрические параметры компрессора

Таблица 1.1

Метод	D2, м	D1, м	Dвт, м	b2, м	b3, м	b4, м	D3, м	D4, м
НЗЛ	0,191	0,115	0,059	0,0124	0,01457	0,01457	0,220	0,2777

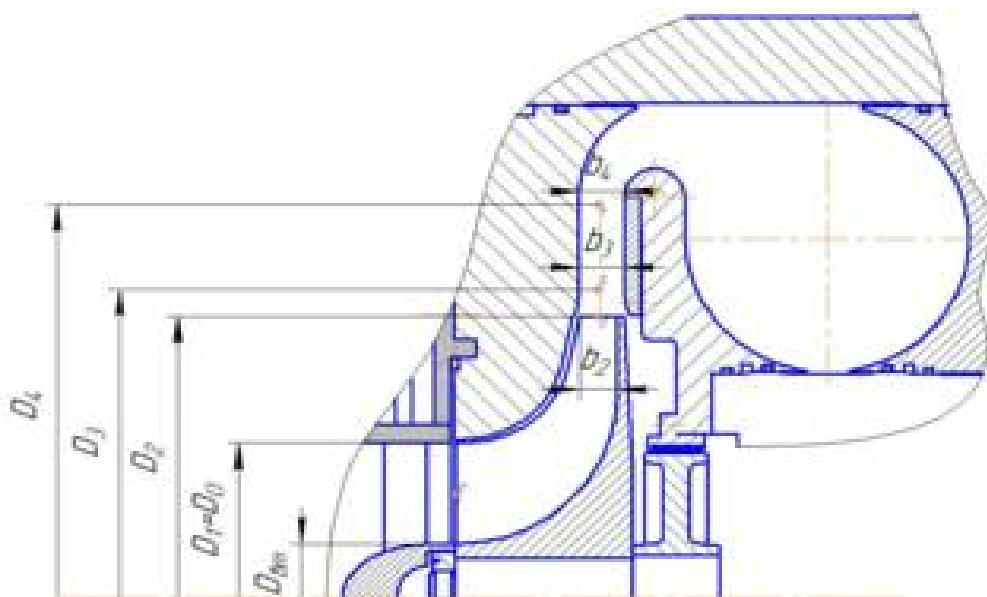


Рис. 1.1. Проточная часть рабочего колеса и диффузора

Газодинамические параметры компрессора

Таблица 1.2

Расчет параметров по методике НЗЛ				
сечение	плотность, кг/м ³	скорость, м/с	температура, К	давление, МПа
1-1	43,91	41	305,53	6,25
2-2	50,28	189,1	322,83	7,54
3-3	50,86	160,72	324,99	7,71
4-4	51,78	100,84	328,4	7,77
ВЫХОД	52,34	30,00	330,35	7,851

Далее с помощью программы «SAPRM», созданной на базе кафедры «Компрессорной вакуумной и холодильной техники» Санкт-Петербургского Политехнического Университета имени Петра Великого (СПбПУ им. Петра Великого), производилась оптимизация параметров газодинамического расчета. Результаты расчета приведены в таблицах 1.3, 1.4.

Геометрические параметры компрессора

Таблица 1.3

Метод	D2, м	D1, м	Dвт, м	b2, м	b3, м	b4, м	D3, м	D4, м
НЗЛ	0,191	0,115	0,07	0,0124	0,0146	0,0146	0,220	0,277

Газодинамические параметры компрессора

Таблица 1.4

Расчет параметров по программе SAPRM				
сечение	плотность, кг/м ³	скорость, м/с	температура, К	давление, МПа
1-1	43,97	108,5	303,3	6,13
2-2	47,99	175,2	320,7	7,18
3-3	48,73	127,5	324,4	7,63
4-4	50,24	61,5	328	7,63

ВЫХОД	50,14	33,4	328	7,62
-------	-------	------	-----	------

В программе SAPR-M было проведено несколько расчётов с разными коэффициентами потерь, выбранными согласно рекомендациям Смагоринского и Симонова, из этих расчётов выделили два с характеристиками, наиболее соответствующими техническому заданию, и провели сравнение этих расчётов с расчётом НЗЛ, результаты сравнения приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5

Сечение Н-Н				
Вариант	ρ , кг/м ³	C, м/с	T, К	p, МПа
v3	43,55	43,9	305,7	6,3
v5	43	40	302,1	6,3
НЗЛ	44,09	41	305,15	6,3
Сечение 1-1				
Вариант	ρ , кг/м ³	C, м/с	T, К	p, МПа
v3	43,97	108,5	303,3	6,13
v5	42,01	94,7	300,9	5,89
НЗЛ	43,91	41	305,53	6,25
Сечение 2-2				
Вариант	ρ , кг/м ³	C, м/с	T, К	p, МПа
v3	47,99	175,2	320,7	7,18
v5	48,97	196,7	317,1	7,23
НЗЛ	50,28	189,1	322,83	7,54
Сечение 3-3				
Вариант	ρ , кг/м ³	C, м/с	T, К	p, МПа
v3	48,73	127,5	324,4	7,63
v5	50,19	112,3	323,7	7,57
НЗЛ	50,86	160,72	324,99	7,71
Сечение 4-4				
Вариант	ρ , кг/м ³	C, м/с	T, К	p, МПа
v3	50,24	61,5	328	7,63
v5	50,3	107,85	324	7,59
НЗЛ	51,78	100,84	328,4	7,77
Сечение К-К				
Вариант	ρ , кг/м ³	C, м/с	T, К	p, МПа
v3	50,14	33,4	328	7,62
v5	51,17	40,7	326,5	7,82
НЗЛ	52,34	30,00	330,35	7,851

1.2. Описание конструкции проектируемого компрессора.

Центробежный компрессор представляет собой двухступенчатую машину с рабочим колесом, расположенным на двух опорах и осерадиальным подводом газа и предназначен для сжатия природного газа и его подачи в магистральные газопроводы.

Нагнетатель приводится во вращение через мультипликатор (повышающий редуктор с передаточным отношением 8,66) синхронным электродвигателем типа СТД-3150-2Р УХЛ4 мощностью 3150 кВт, частотой вращения 3000 об/мин, напряжение 10000 В. Закрытого исполнения с разомкнутой системой вентиляции с воздухоохладителем.

Соединение нагнетателя с мультипликатором и мультипликатора с двигателем осуществляется с помощью пластинчатой муфты. Передаваемая мощность мультипликатора 3400 кВт, число оборотов ведущего вала 3000 об/мин, шестерни – 26000 об/мин. Критическая частота вращения ротора нагнетателя около 50000 об/мин.

Состоит нагнетатель из следующих частей: фундаментной рамы, цилиндра компрессора, газодинамического уплотнения, двух опорных магнитных подшипников, упорного магнитного подшипника, корпуса подшипников с трубопроводом, соединительной упругой пластинчатой муфты.

Цилиндр компрессора воспринимает давление сжимаемого газа и является базовой деталью, в которую устанавливаются торцовые крышки, без лопаточного диффузора, обоймы лабиринтных уплотнений, ротор. Цилиндр имеет кованую стальную оболочку, к которой приварен нагнетательный патрубок, четыре опоры, два наварыша. Также к цилиндру прикручены четыре захвата для строповки.

Внутренняя расточка цилиндра выполнена ступенчатой, что облегчает сборку и разборку компрессора. На двух опорах на стороне всасывания

имеются пазы под установку поперечных шпонок, в наварышах выполнены пазы под осевые шпонки.

По внутренней расточке цилиндра выполнены канавки со стороны всасывания и нагнетания под установку запорных колец из восьми частей. Сектора колец крепятся в пазах винтами.

Цилиндр крепится к фундаментной раме четырьмя болтами с контрольными шайбами. Крестообразно расположенные шпонки фиксируют нагнетатель на раме.

Рама фундаментная служит основанием для нагнетателя. Обеспечивает фиксацию нагнетателя к фундаменту на четырех стяжках и монтажных подкладках. Центровка агрегата при монтаже достигается установкой рамы на фундаменте. При необходимости центровка может быть изменена в процессе наладки или при эксплуатации за счёт системы шпонок между рамой и цилиндром нагнетателя.

К передней крышке с помощью болтов подсоединён корпус всасывающего патрубка. В задней крышке выполнены сверления для подвода и отвода газов из СГУ. Внутри расточки задней крышки устанавливаются обоймы сухого и лабиринтных уплотнений, в том числе лабиринтные уплотнения думмиса. По наружным диаметрам крышек выполнены канавки под установку уплотнительных колец на резиновой основе, предназначенных для работы на высоких давлениях. К задней крышке подсоединяется блок подшипников.

Ротор нагнетателя жесткий. Состоит из вала, на котором насажены рабочее колесо, думмис, втулка страховочных подшипников, втулка опорных подшипников, втулка уплотнения, роторная часть СГУ, упорный диск, втулка упорного подшипника, стопорное кольцо и стяжное кольцо, муфта, четыре гайки со стопорными шайбами. Ротор тщательно отбалансирован.

Материалом вала является сталь 40Х ГОСТ 4543-71. Заготовкой служит поковка, изготовленная методом свободнойковки на молотах. Вал выполнен ступенчатым для удобства при насадке деталей во время сборки ротора. Между

отдельными насаживаемыми на вал деталями предусмотрены тепловые осевые зазоры порядка $0,1 \div 0,2$ мм, позволяющие деталям удлиняться по оси от нагрева.

Нагнетатель снабжен газодинамическим уплотнением, расположенным между блоком подшипников и муфтой. Уплотнение предназначено для герметизации сжимаемого газа по валу в динамическом и статическом режимах работы. Узел уплотнения выполнен по схеме "двойные, последовательные уплотнения с подачей барьерного воздуха для продувки концевой лабиринта". Каждая из ступеней уплотнения состоит из двух колец: вращающегося опорного и аксиально-подвижного упорного.

Осерадальное рабочее колесо состоит из основного диска с рабочими лопатками аэродинамического профиля в количестве 24 штук. Лопатки рабочего колеса, цельно фрезерованные из тела основного диска. Рабочее колесо посажено на вал с натягом, обеспечивающим передачу крутящего момента. Для гарантии, кроме того, выполнено шпоночное соединение. Посадка колеса на вал обеспечивается за счёт охлаждения консольной части вала.

Опорные подшипники состоят из электромагнитов и электронной системы управления, они воспринимают силу тяжести ротора и фиксируют его в радиальном направлении. Механический контакт между ротором и статором отсутствует. Смещения ротора из заданного положения равновесия измеряются датчиками положения. Магнитные силы возвращают ротор в исходное положение. При отключенном подвесе, а также в случае аварийного сбоя в системе управления ротор опирается на страховочные подшипники, установленные с зазором (в нормальном режиме они не вращаются).

Для устранения перемещения ротора под действием осевого усилия на валу размещён упорный подшипник (осевой) двустороннего действия. Он состоит из сплошного ферромагнитного диска, который располагается между кольцевыми электромагнитами с обмотками.

Корпус подшипников – стальной, разъемный, предназначен для установки опорных и упорного подшипников. Верхняя и нижняя части соединены между собой шпильками и гайками и присоединены к корпусу компрессора. Блок подшипников снабжен трубопроводами подвода и отвода газа.

Муфта пластинчатая упругая предназначена для передачи крутящего момента от привода к компрессору с одновременной компенсацией радиальных, угловых и осевых смещений соединяемых валов: препятствует бесконтрольному осевому перемещению валов на выбеге и стоянке, поскольку при осевом смещении возникает упругая восстанавливающая сила, возвращающая валы в положение, заданное при монтаже; поглощает угловые и радиальные смещения мягко, без ударов и трения (за счёт сил рассеивания в материале – высокопрочная легированная сталь).

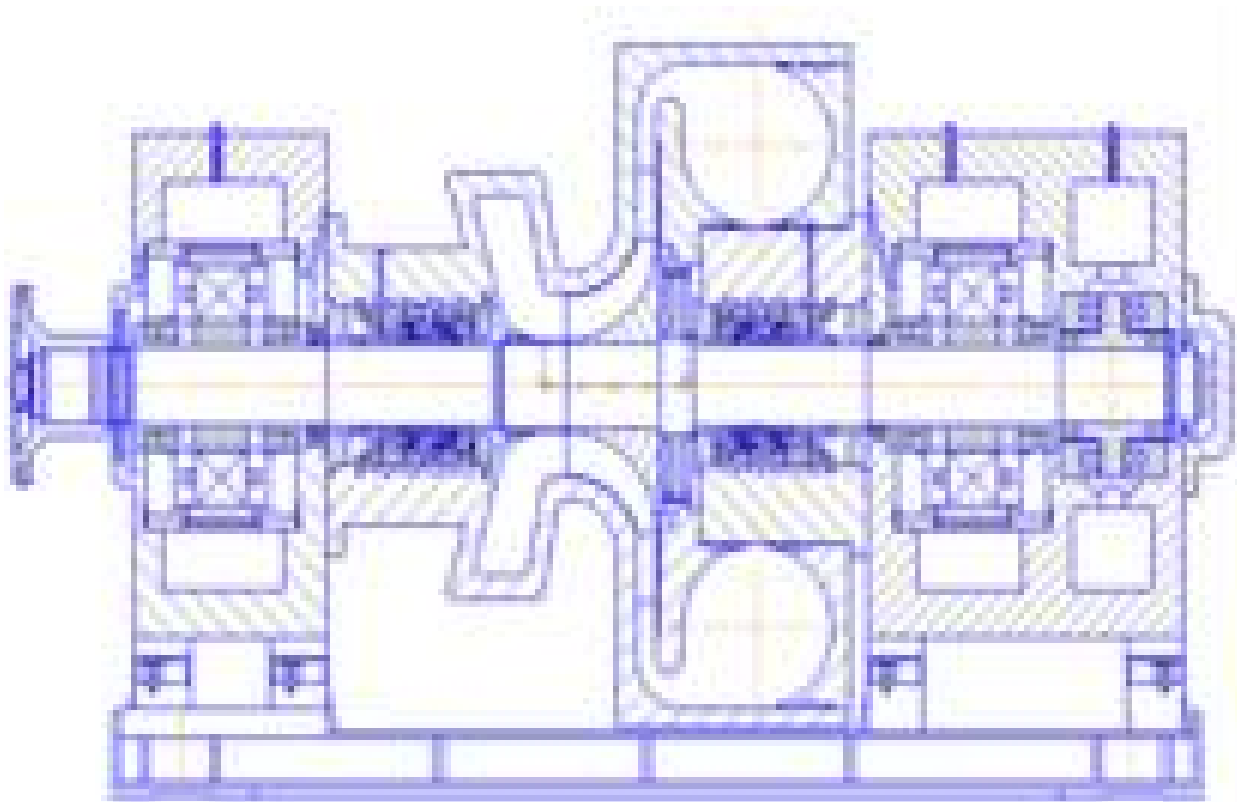


Рис. 1.2 Двух опорный центробежный компрессор

1.3 Объект исследования

Для исследования выбрана ступень прототипа ГПА «Ладога». Частоту вращения компрессора составляет $n=26000$ об/мин., обладает газодинамическими параметрами, приведенными в таблицах 1.2-6. Колесо осерадиальное, полузакрытого типа с рабочими лопатками в количестве 24 штук. Выходным устройством выбрана сборная камера с постоянным сечением.

1.4 Описание программно-инженерного комплекса ANSYS Workbench

16.2

Для моделирования расчета использовался программный комплекс ANSYS Workbench 16.2.

ANSYS Workbench 16.2 — это программный комплекс, состоящий из большого количества программ разного назначения, от расчета электрических цепей, до газодинамического расчета компрессора, основной задачей которой является численное решение уравнений Навье-Стокса. Математические модели, разработанные в рамках вычислительной газодинамики, в настоящее время представляют собой базу для исследования большого числа разнообразных технологических процессов.

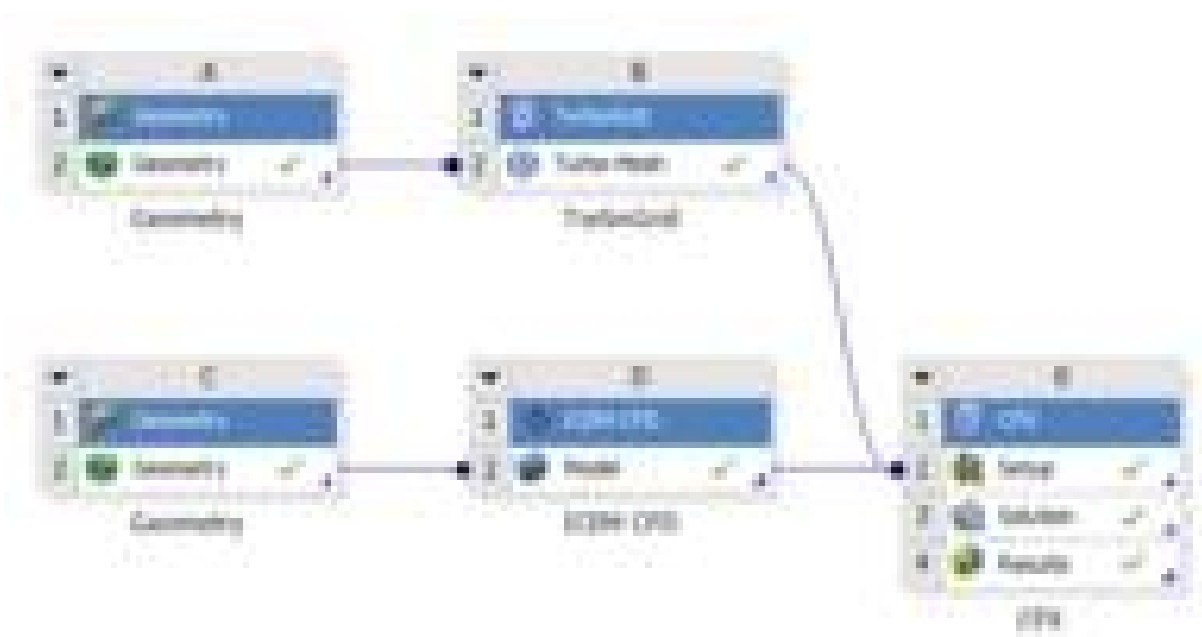


Рис. 1.3 Сетка полного расчета «ANSYS Workbench»

Для составления 3D-моделей можно использовать встроенный модуль «Geometry», а также сторонние программы так как, «Ansys» поддерживает многие типы файлов. В нашем случае использовалась программа «КОМПАС-3D», построенная геометрия сохраняется в формате «IGES» и импортируется в модуль «Geometry», далее сектора разбиваются по назначениям «Inlet», «Outlet», «Wall» и т.д. Данная программа позволяет быстро и качественно построить необходимую модель и оперативно изменить параметры в случае необходимости.

Ниже представлены изображения, описывающие суть создания лопатки рабочего колена (рисунок 1.4,1.5). На рисунке 1.4 изображены три сечения, втулочное, среднее и наружное. С помощью операции выдавливание по сечениям мы получаем заготовку (рисунок 1.6) для последующей обработки в модуле «Geometry». На рисунке 1.5 изображена параметризованное наружное сечение, для каждого из трех сечений строится отдельная модель.

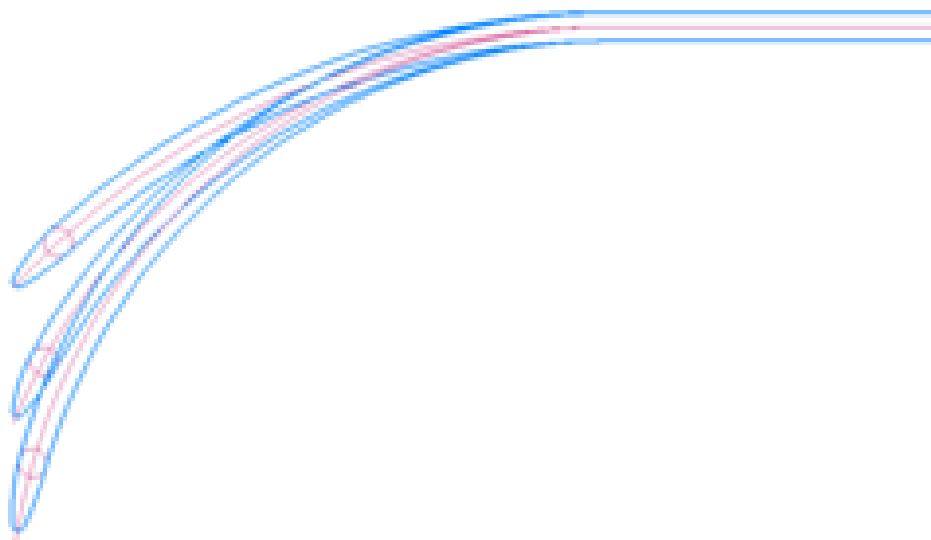


Рис. 1.4 Сечения для создания полной модель осерадальной лопатки

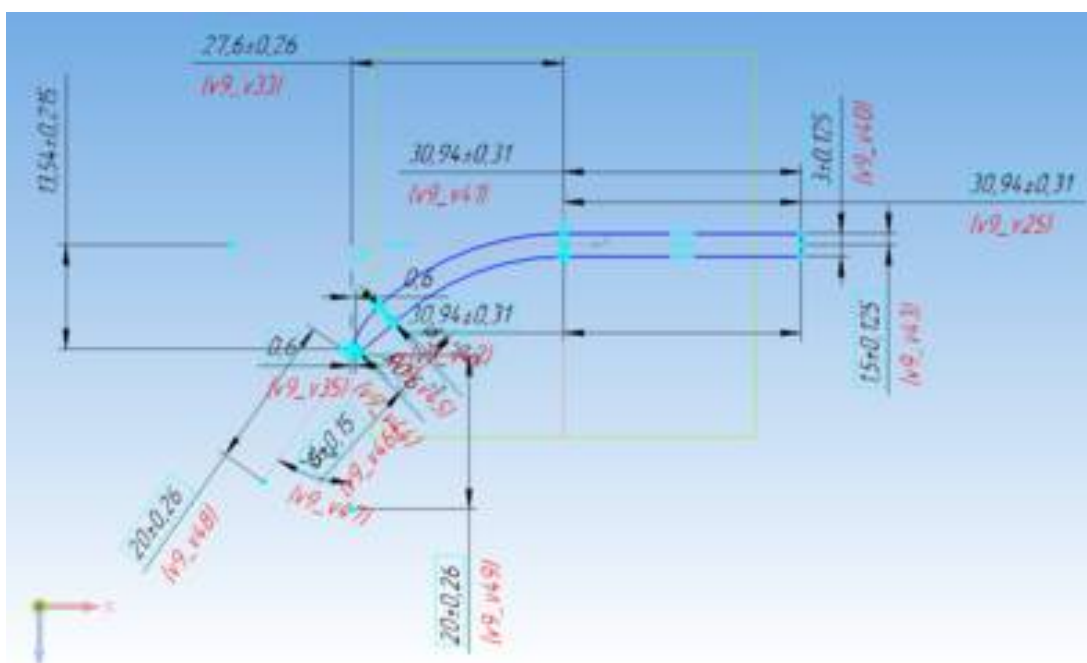


Рис. 1.5 Параметризованное сечение

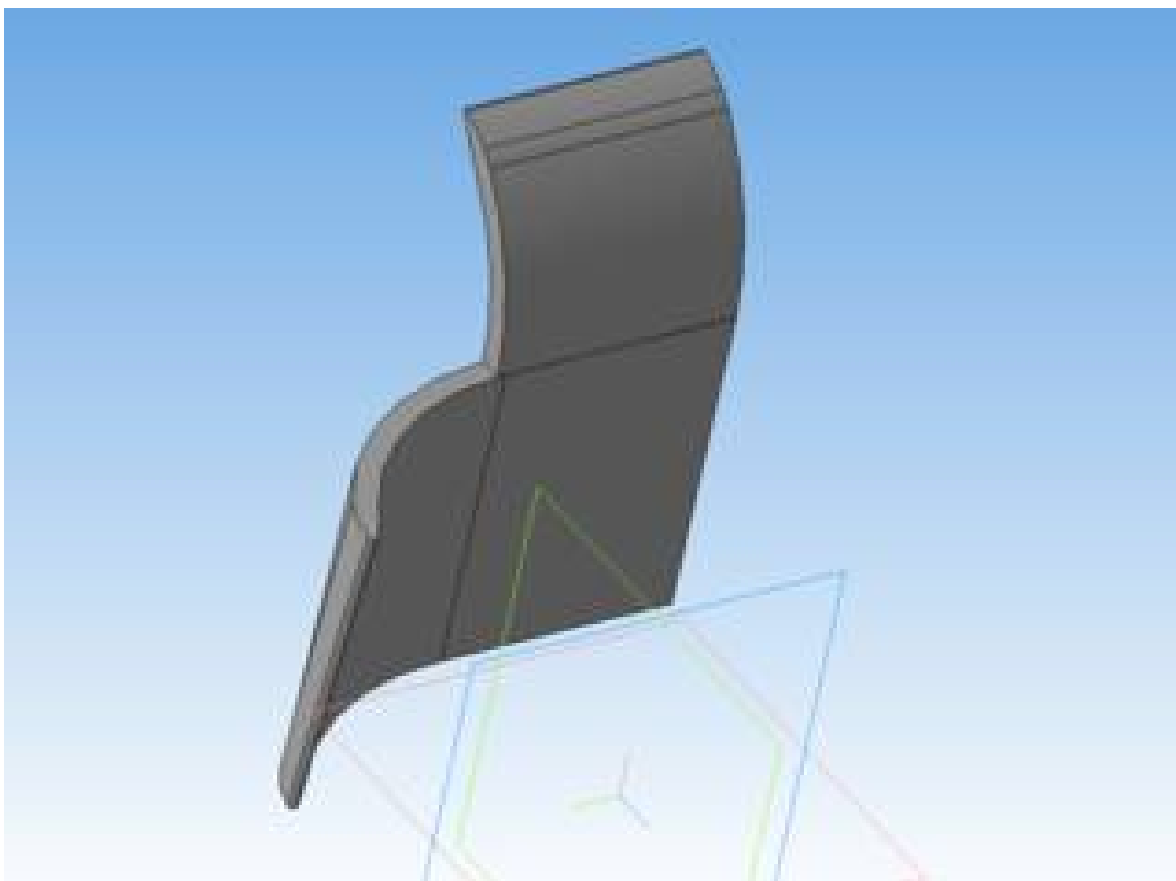


Рис. 1.6 Заготовка лопатки рабочего колеса

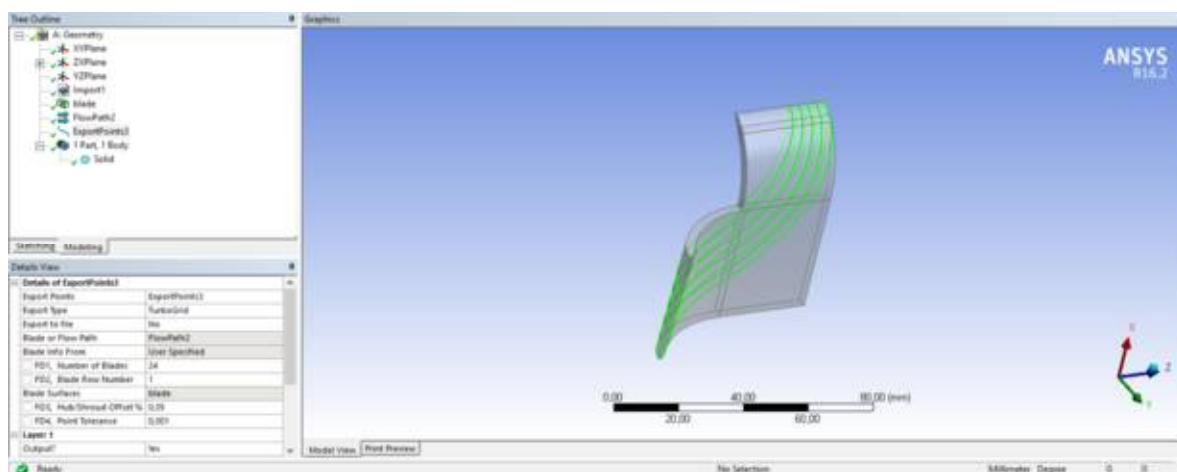


Рис. 1.7 Модель лопатки в модуле «Geometry»

На рисунке 1.7 изображено моделирование конечных параметров лопатки, именно на данном этапе, определяется конечный вид лопатки.

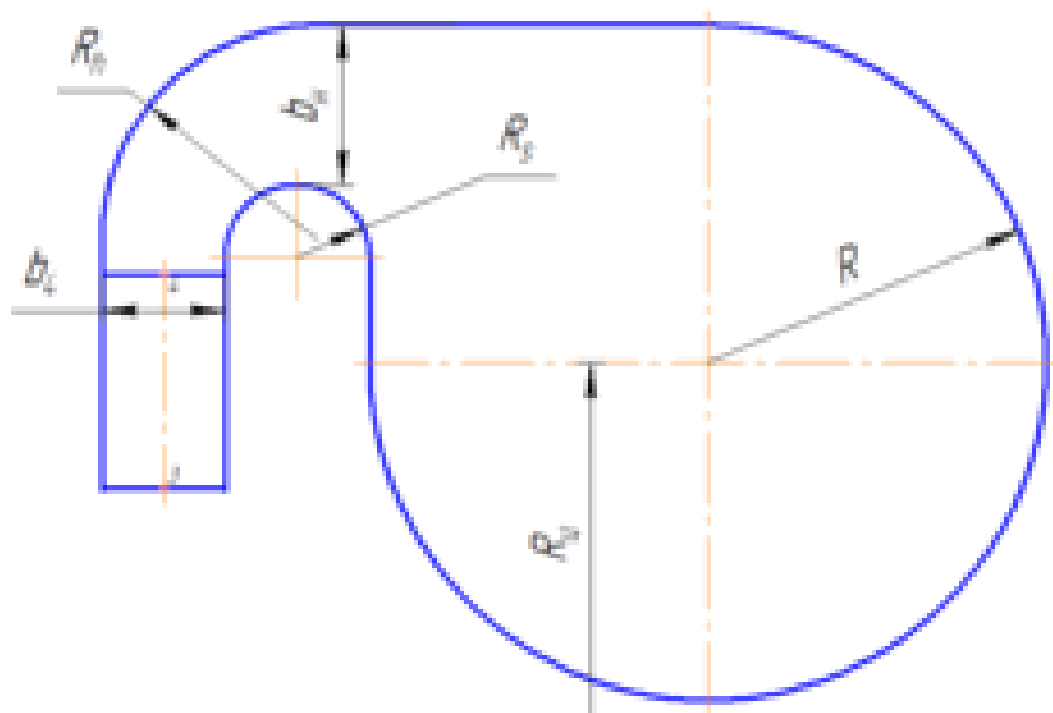


Рис. 1.8 Сборная камера постоянного сечения

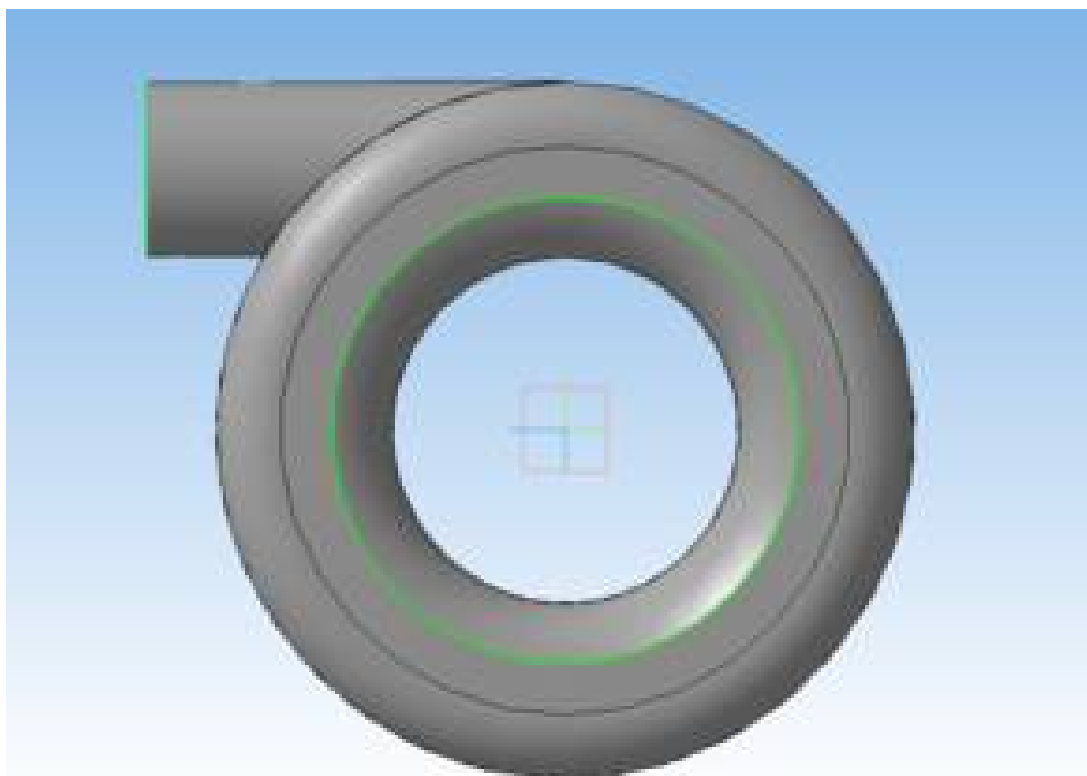


Рис. 1.9 Профиль сборной камеры

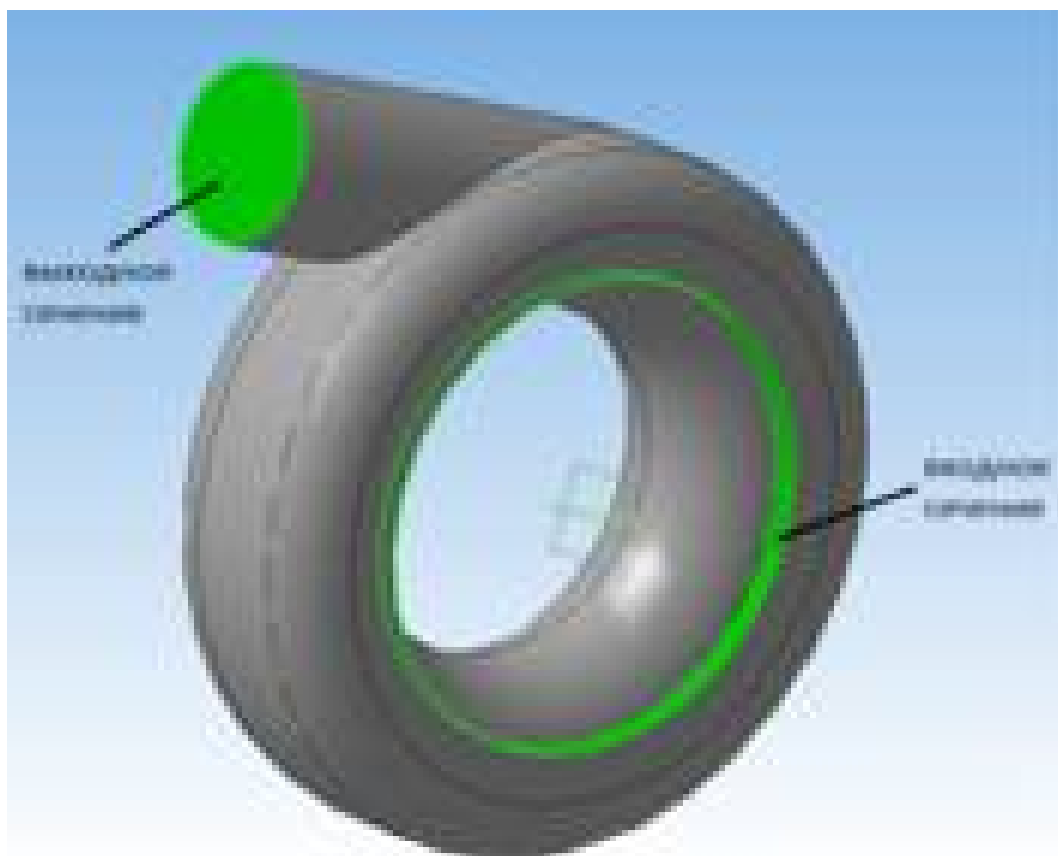


Рис. 1.10 Входное и выходное сечение улитки

В ходе работы также использовались другие модули для построения сеточного модуля и задания параметров расчета.

ICEM CFD – модуль для построения сетки объектов разной формы, он универсален и позволяет задавать множество параметров, таких как размер и форма ячейки, задание условий пристеночного слоя его количество и высоту.

MESH – модуль, также предназначенный для построения сетки, в нем делать сетку гораздо проще, все параметры программа задает сама, мы выбираем только количество элементов, это является как плюсом, так и минусом, сетку строить стало сильно проще, но ее вариативность почти отсутствует.

Turbo Grid – еще один модуль для построения сетки, в которой можно задавать условия пристеночного слоя и задавать сгущение сетки в необходимых местах.

После построения сетки всех участков конструкции, объект импортируется в модуль CFX. Там задаются граничные условия.

1.5 Обработка результатов численного моделирования

По полученным данным можно составить характеристики для сравнения с характеристиками, полученными при расчете по методике SAPR.

1. Показатель политропы $\frac{n}{n-1}$:

$$\frac{n}{n-1} = \frac{\lg \frac{p_i}{p_0}}{\lg \frac{T_i}{T_0}} \quad (1.1)$$

2. Коэффициент политропного напора:

$$\psi_p = \frac{h_p}{U_2^2} \quad (1.2)$$

где h_p - статический политропный напор, Дж/кг, определяется как

$$h_{pi} = \frac{n}{n-1} RT_0 \left[\left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (1.3)$$

3. Динамический напор h_d , Дж/кг:

$$h_d = \frac{c_i^2 - c_0^2}{2} \quad (1.4)$$

4. Выражение для внутреннего напора

$$h_i = C_p \Delta T \quad (1.5)$$

5. Коэффициент внутреннего и теоретического напоров определяется как:

$$\psi_i = \frac{h_i}{U_2^2} \quad (1.6)$$

6. Политропный КПД по полным параметрам определяется по зависимости:

$$\eta_{\Pi}^* = \frac{h_{\Pi} + h_d}{h_i} \quad (1.7)$$

7. Степень повышения давление в рабочем колесе:

$$\Pi_{1-2} = \frac{p_2}{p_1} \quad (1.8)$$

8. Степень повышения давления в компрессоре:

$$\Pi = \frac{p_k}{p_n} \quad (1.9)$$

9. Повышение температуры в компрессоре:

$$\Delta T = T_k - T_n \quad (1.10)$$

10. Потери в лопаточном диффузоре:

$$\xi_{2-4} = R \cdot \frac{c^2}{2} \cdot (p_2^* - p_4^*) \quad (1.11)$$

11. Определение мощности компрессора:

$$N = h_i^* \cdot m \quad (1.12)$$

1.6 Описание структуры модели

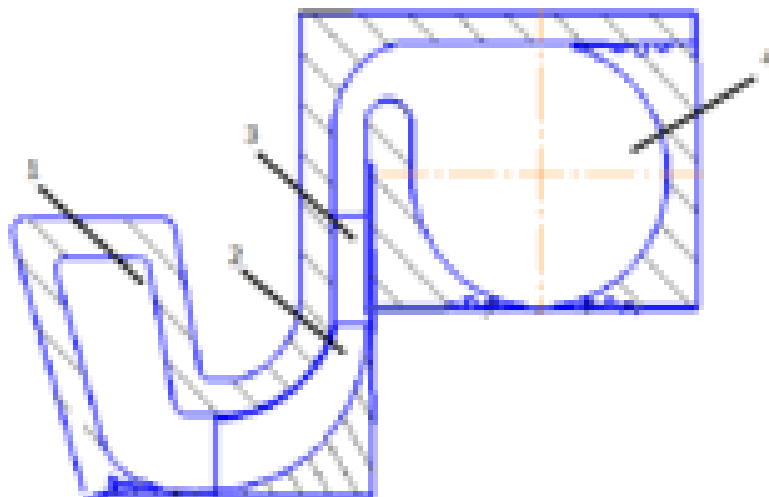


Рис. 1.11 Проточная часть ЦК

На рис. 1.11 представлен эскиз проточной части исследуемой ступени прототипа ГПА «Ладога». Ступень состоит из 4 основных частей:

- 1 – камера всасывания,
- 2 – рабочее колесо,
- 3 – безлопаточный диффузор (БЛД),
- 4 – выходная камера (сборная камера постоянного сечения)

Решалась стационарная задача (решение через относительные скорости потока).

Модель турбулентности - SST (Shear Stress Transport)

Граничные условия для моделирования:

- Рабочая среда – природный газ

- Полное давление газа на входе в ступень P_n^* , Па
- Полная температура газа на входе в ступень T_n^* , К
- Массовый расход газа m , кг/с
- Частота вращения ротора $n=26000$ об/мин

При моделировании ступени граничные условия на входе остаются неизменными, частота вращения тоже не изменяется, изменяется только массовый расход. Это делается для снятия характеристик компрессора.

Для наглядности на рисунках 1.13-17. изображены поверхности граничных условий.

Граничные условия

Таблица 1.6

№	T_n^* , К	P_n^* , Па	m , кг/с	n , об/мин
1	306,15	6356804	6	26000
2	306,15	6356804	7	26000
3	306,15	6356804	8	26000
4	306,15	6356804	9	26000

На рисунках 1.12-1.15 указаны все элементы конструкции и их расположение, в этих элементах и задаются граничные условия, а именно во входном сечении мы задаем давление и температуру газа, который нагнетается в нашу дожимную ступень, а в выходном задаем массовый расход необходимый нам.

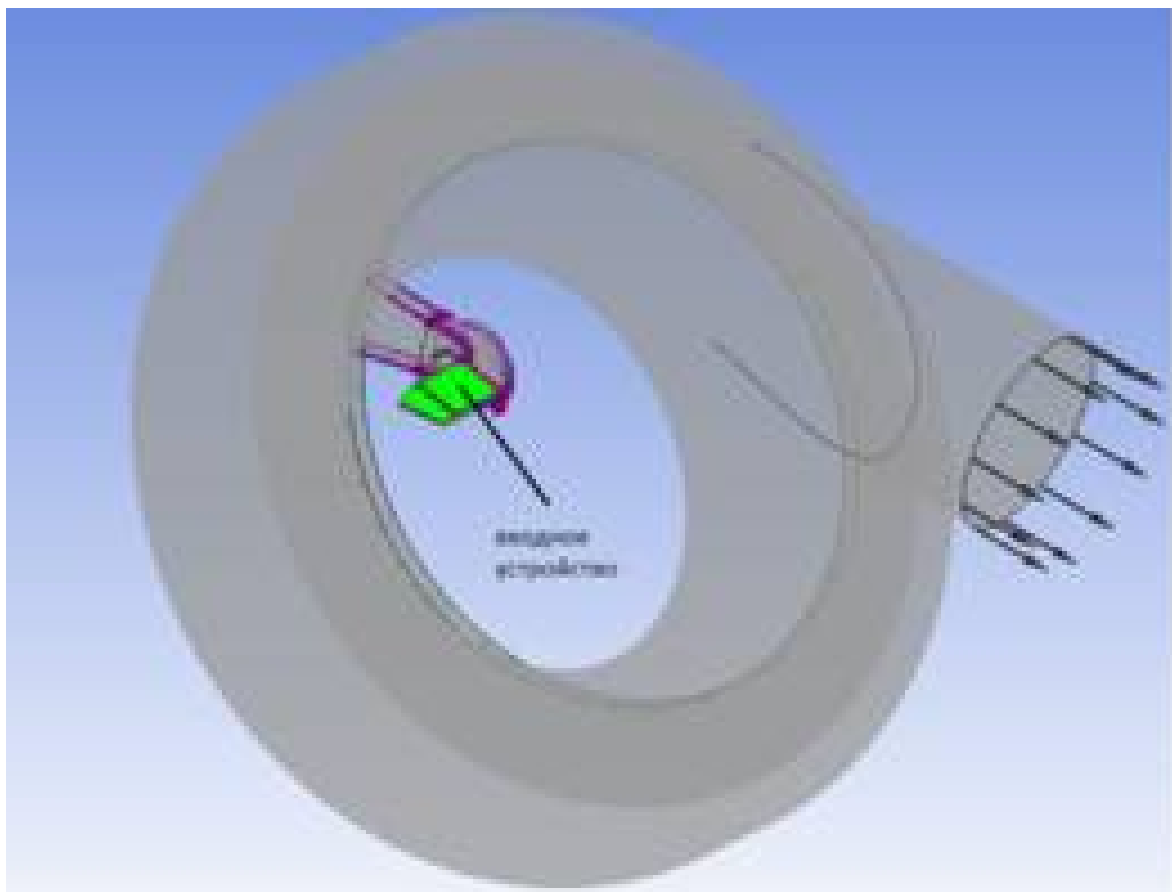


Рис. 1.12 Изображение входного устройства

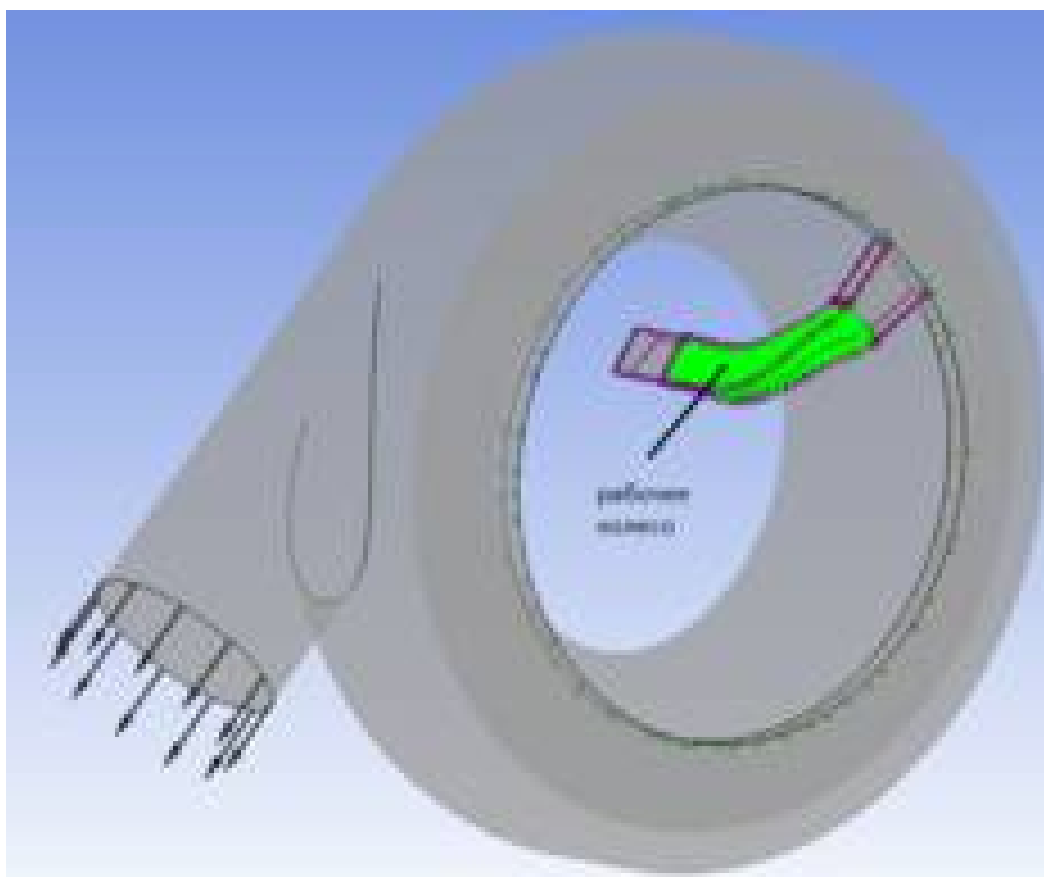


Рис. 1.13 Расположение рабочего колеса

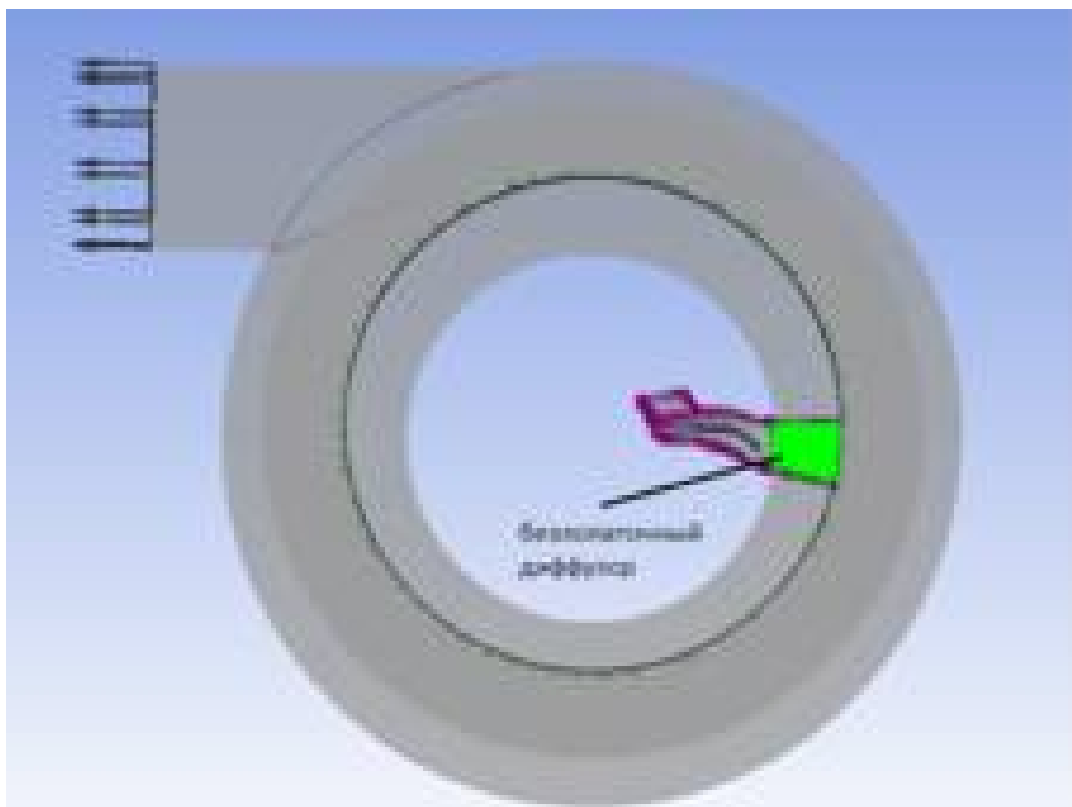


Рис. 1.14 Безлопачный диффузор

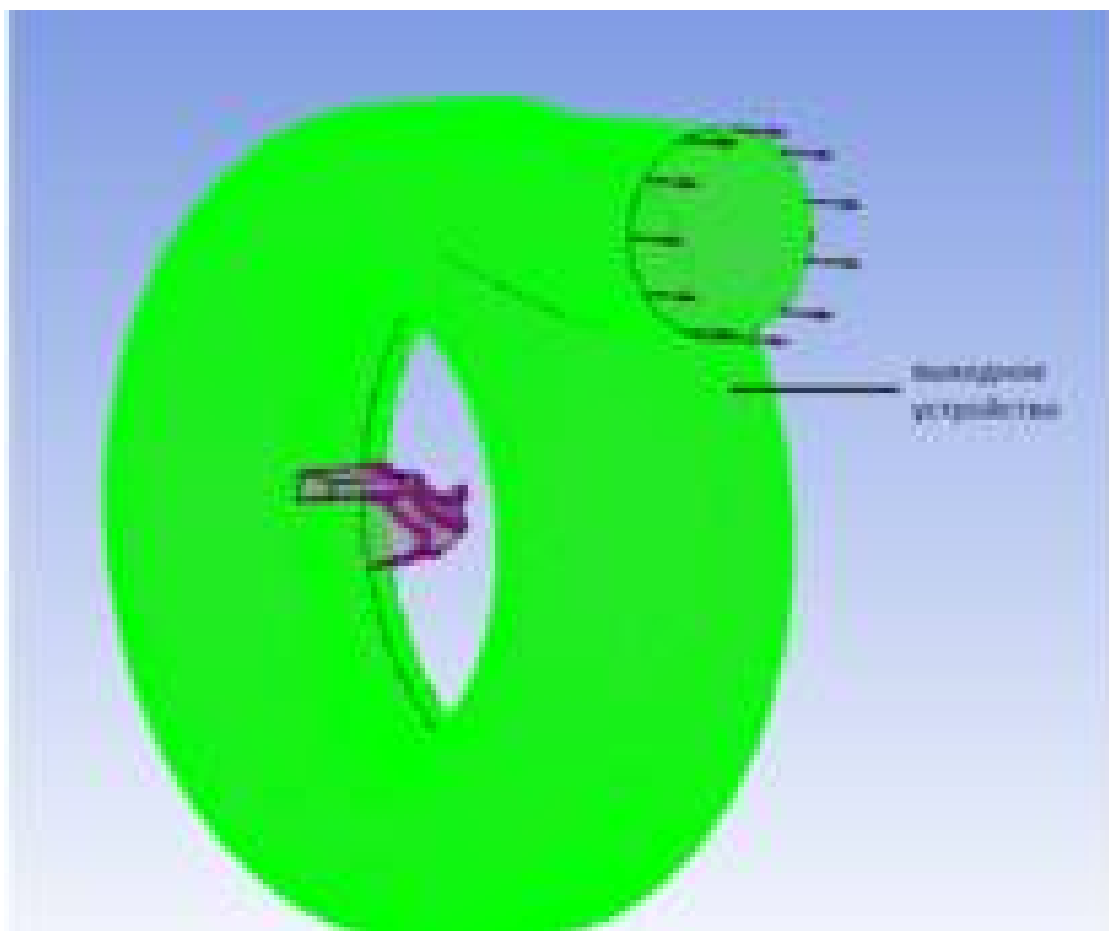


Рис. 1.15 Выходное устройство

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1 Построение сетки

Построение сетки является ключевым этапом в работе, от того, как сетка будет сгенерирована зависит успех дальнейшего расчета. Сетка строится поэлементно, отдельно для каждой детали: для камеры всасывания, рабочего колеса, диффузора и сборной камеры. Для каждой части выбираются разные условия построения, количество элементов, высота и количество пристеночных слоев. Для входного устройства, рабочего колеса и диффузора сетка считалась в модуле «TurboGrid».

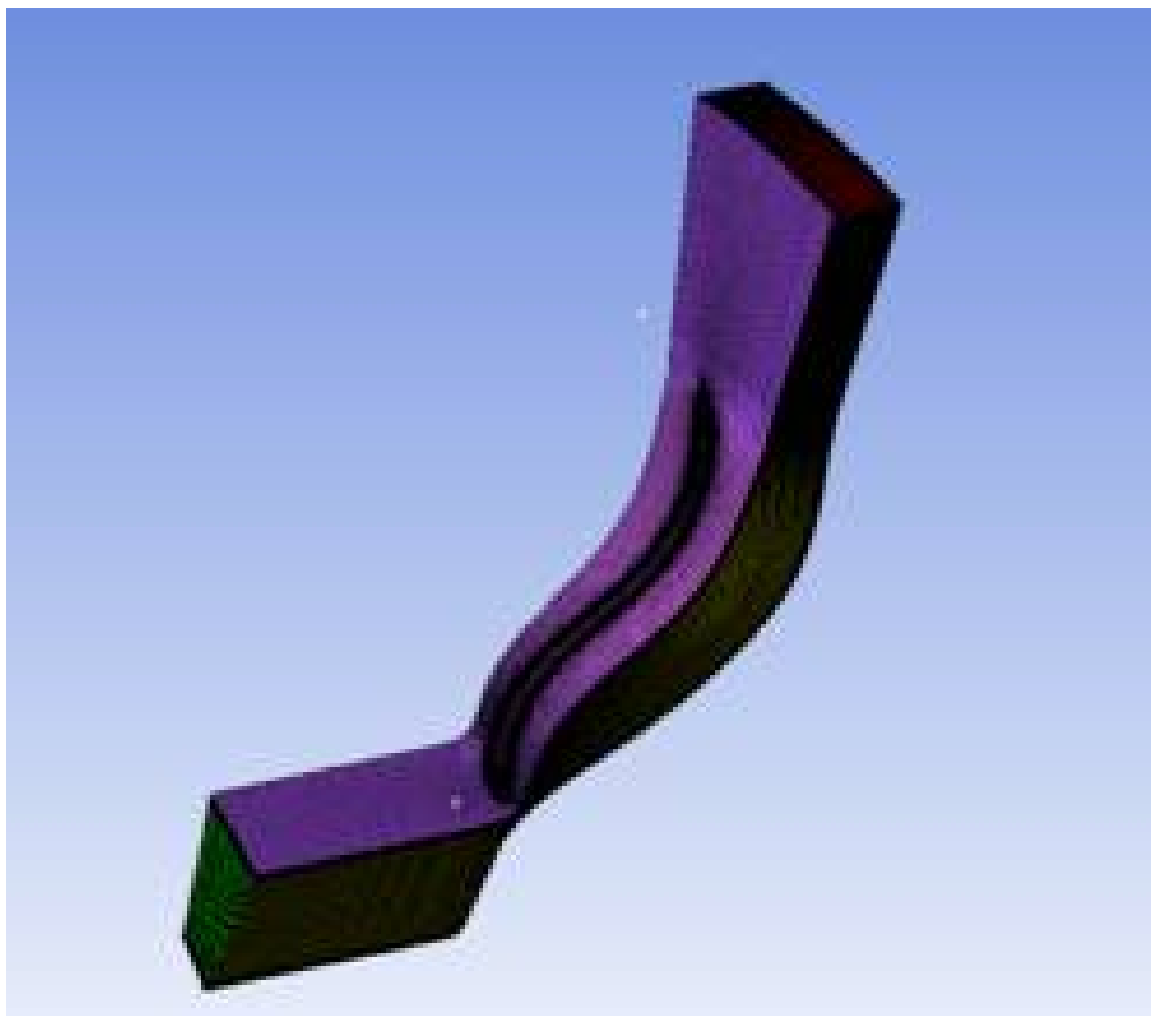


Рис.2.1 Сетка поверхностных слоев



Рис.2.2 Сетка осерадиальной лопатки

Основными параметрами при построении являются Wall distance (размер пристеночного слоя), End ratio (масштаб), Layer offset (смещение слоя). Задаются эти параметры во вкладке «Mesh Data», во вкладках «Mesh Size» и «Passage» (рисунок 2.3,2.4).

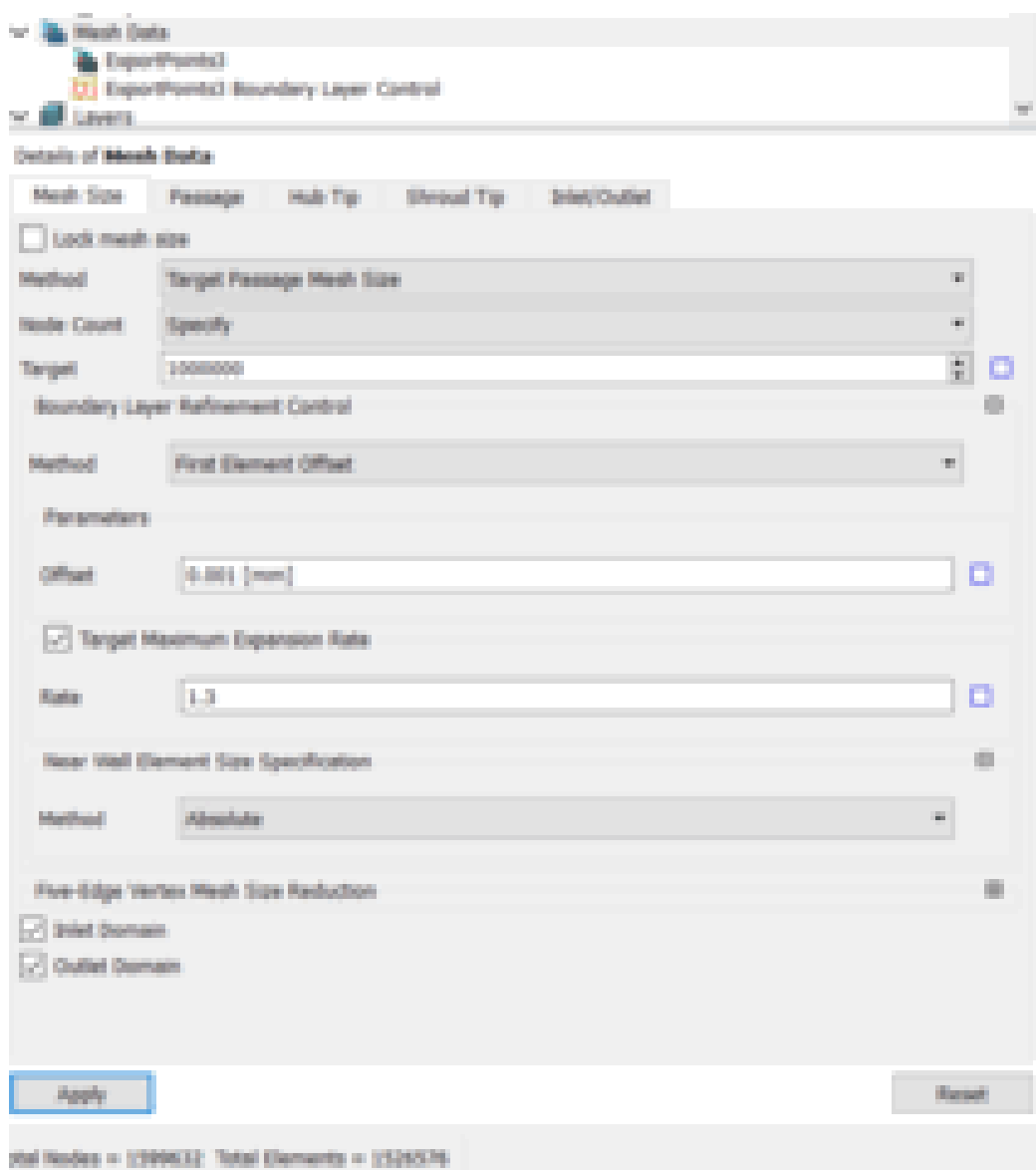


Рис. 2.3 Параметры размерности сетки

В первой вкладке настроек мы задаем количество элементов, смещение пристеночного слоя и фактор увеличения элементов. Как мы видим из заданных параметров смещения слоя равно 0.001мм, количество элементов 1000000, а фактор увеличения 1.3. В графе ниже мы видим, что суммарное количество элементов равно 1526576, это получается потому, что программа сама увеличивает количество элементов для получения наиболее благоприятных ячеек и делает она это в пределах допуска фактора увеличения.



Рис. 2.4 Параметры пристеночного слоя

В параметрах пристеночного слоя задаем смещение и размер, а также факторы увеличения ячеек увеличения ячеек на каждом из слоев отдельно. В нашем случае размер пристеночного слоя равен 0.001мм, смещение слоя 0.1мм а масштаб для хаба и шрауда равен по 1.3 соответственно. Значение размера пристеночного слоя в 0.001 мм нам необходимо запомнить, так как на стыках элементов это значение должно быть везде одинаковым. **СКРИНЫ АНАЛИЗА**

Для сборной камеры сетка строилась в программе «ICEM-CFD», это программа сложнее в освоении, но и вариативности в ней больше.

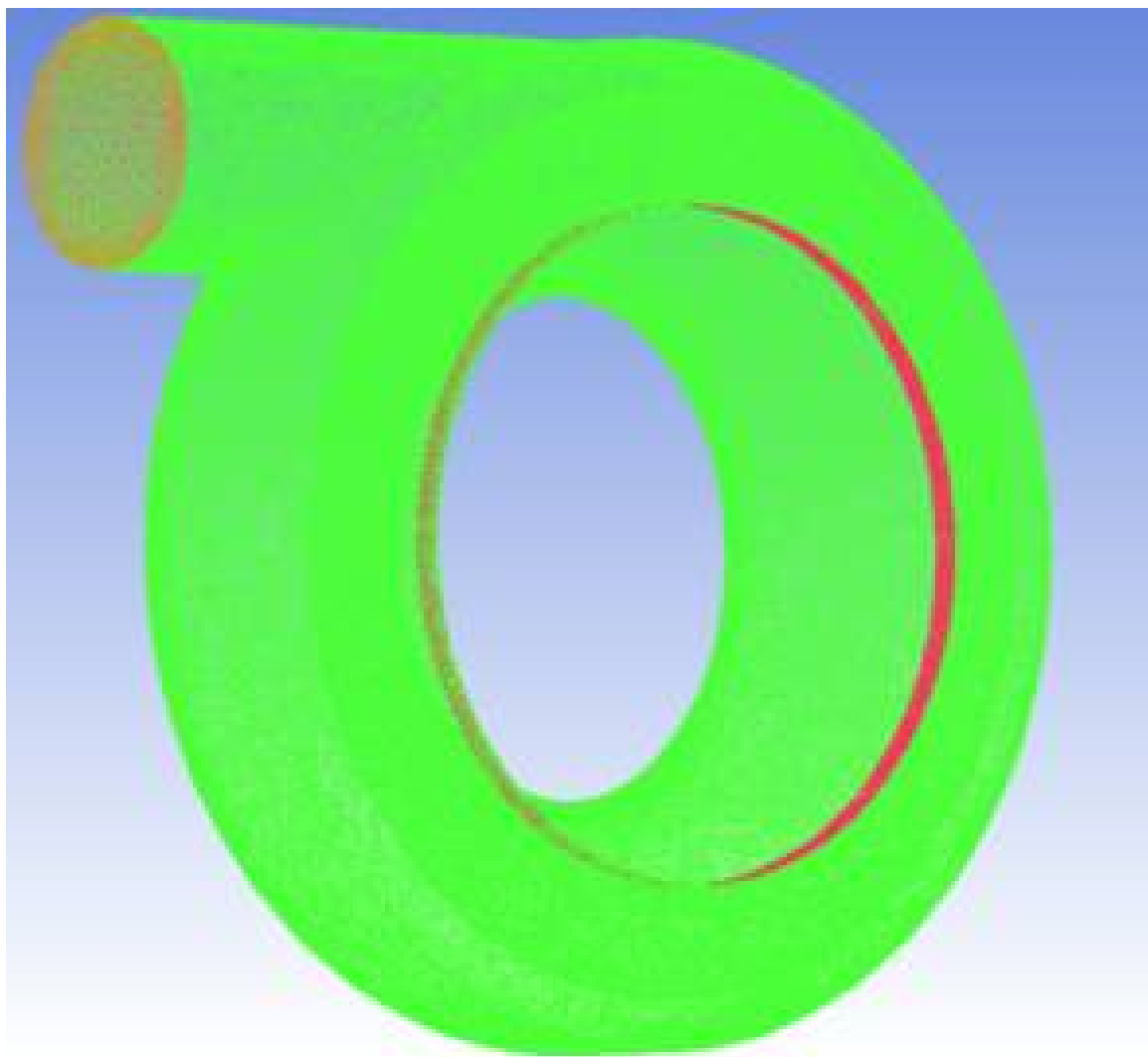


Рис. 2.5 Сетка сборной камеры

Таблица 2.1

Параметры основной сетки

Название	Сборная камера
Max element size (максимальный размер ячейки)	5 мм
Scale factor (масштаб)	2.3
Smooth Iterations (сглаженная итерация)	10
Height ratio (соотношение высоты)	1.3

Таблица 2.2

Параметры сетки на отдельных поверхностях

Сборная камера постоянного сечения					
Название поверхности	Макс. размер ячейки на поверхности	Высота пристеночного слоя	Соотношение высоты	Число слоев	Соотношение тетраэдрических размеров ячейки
INLET (вход)	0.08 мм	-	-	-	-
OUTLET (выход)	автоматически	-	-	-	-
WALLS (стенка близкая ко входу)	0.2 мм	0.001 мм	1.3	10	1.3
WALLB (стенка)	0.2 мм	0.001 мм	1.3	10	1.3

На этапе задания параметров важно помнить высоту пристеночного слоя, она у нас равно 0.001 мм, количество их равно 10, остальные параметры подбираются под наилучшее качество сетки (рисунок 2.7), от них напрямую зависит количество элементов. Ниже представлен пример пристеночного слоя, на выходном сечении (рисунок 2.6).

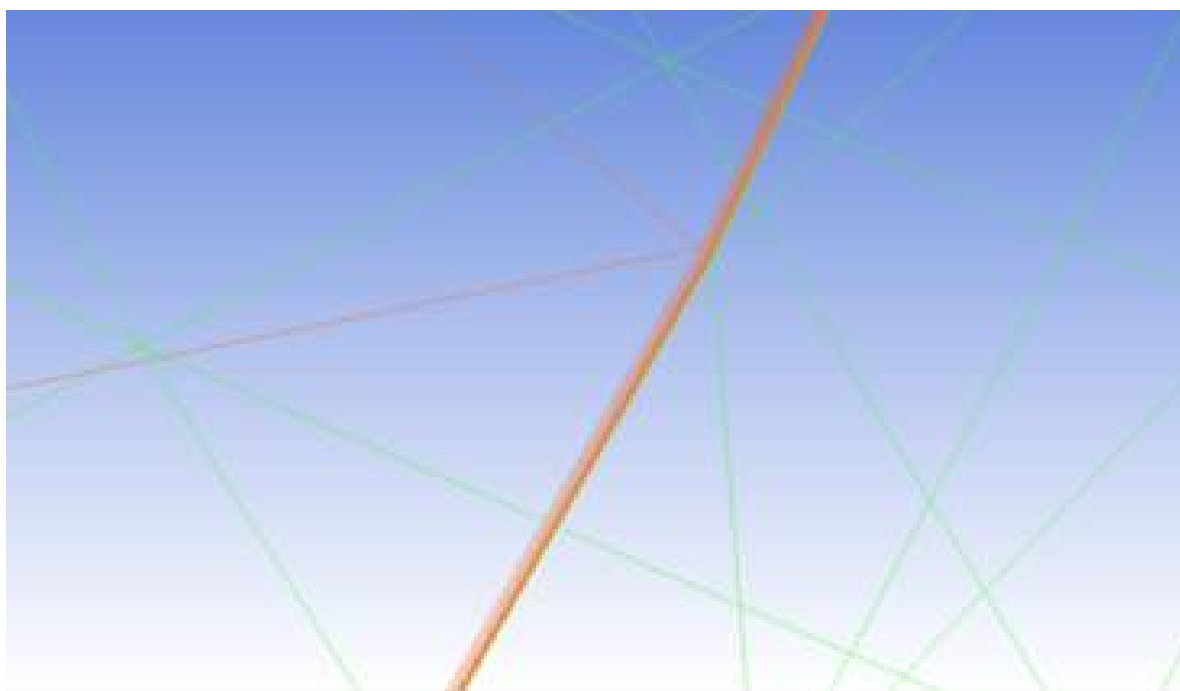


Рис.2.6 Пример пристеночного слоя

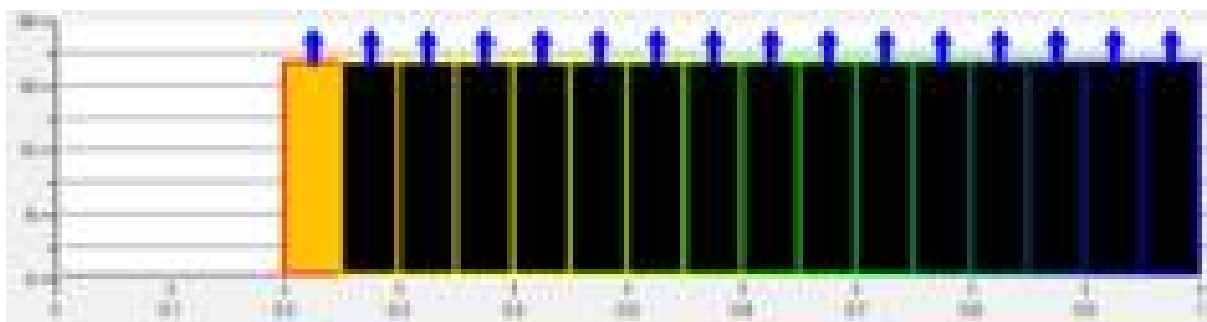


Рис.2.7 Качество сетки сборной камеры

Таблица 2.4.

Количество ячеек в каждом элементе

Наименование элемента	Количество ячеек, млн
Камера всасывания	0,33
Рабочее колесо	1
Лопаточный диффузор	0,22
Улитка	2,9

2.2. Задача валидации эксперимента

После построения всех частей конструкции и моделирования сетки для каждой из них, модель импортируется в расчетный модуль «CFX», где задаются граничные условия и параметры расчета. Граничные условия: давление и температура по полным параметрам, рабочая среда, массовый расход и частота вращения. При введении массового расхода на выходе из рабочего колеса важно помнить про параметр площади массового расхода, он определяет разбивать введенный расход по секциям или считать расход как для одной части. Расчет производился для 4 массовых расходов для нахождения оптимального режима и сравнение с методическим расчетом.

Сначала производили расчет исключительно рабочего колеса, для получения картины расчета и возможности инициализировать этот расчет в следующий для более быстрой сходимости полного расчета.

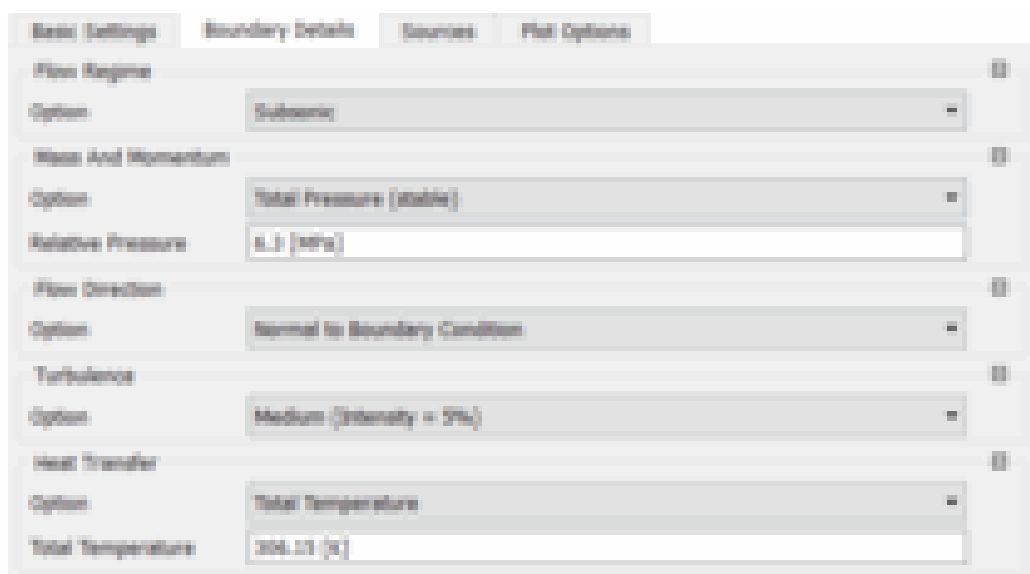


Рис. 2.8 Задание граничных условий на входе

После задания граничных условий, необходимо настроить параметры самого расчета, а именно количество минимальных и максимальных итераций, фактор сходимости расчета (Timescale) и пределы погрешности расчета (Residual Target), при достижении которых расчет будет завершен, при этом автоматически создается файл результатов расчета.

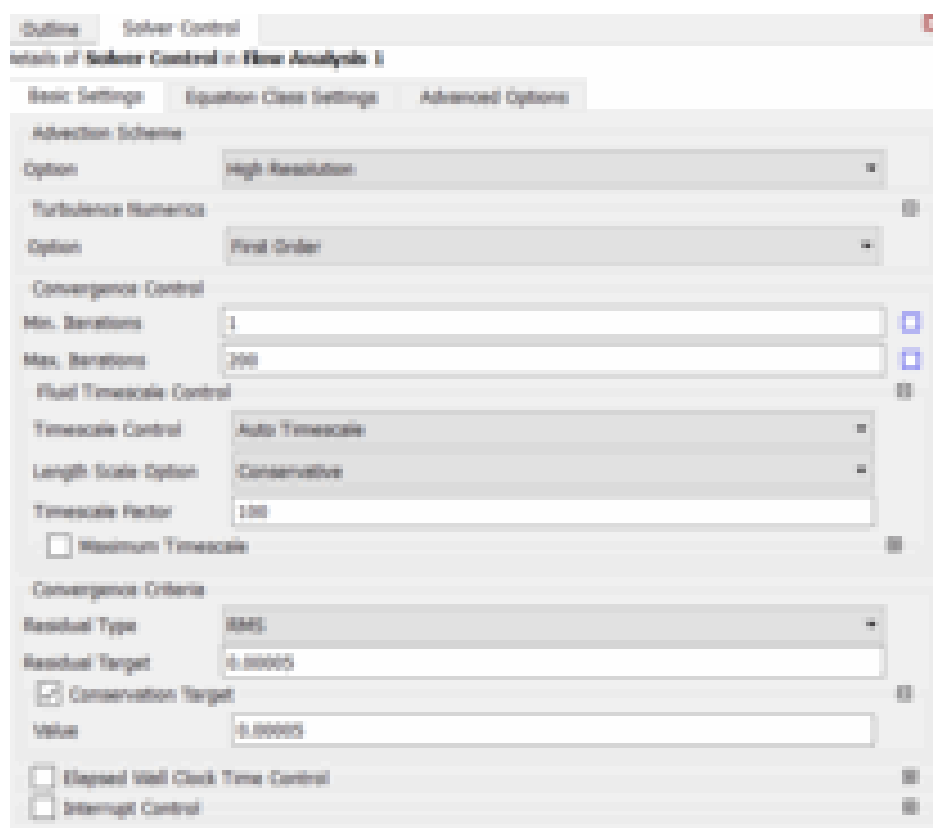


Рис. 2.9 Параметры итерационного метода расчета

При первом расчете только рабочего колеса по изначальным параметрам задача сошлась на 80 итерации, фактор сходимости был равен 100, а процент отклонений максимальный процент отклонений был равен 0.000003 %.

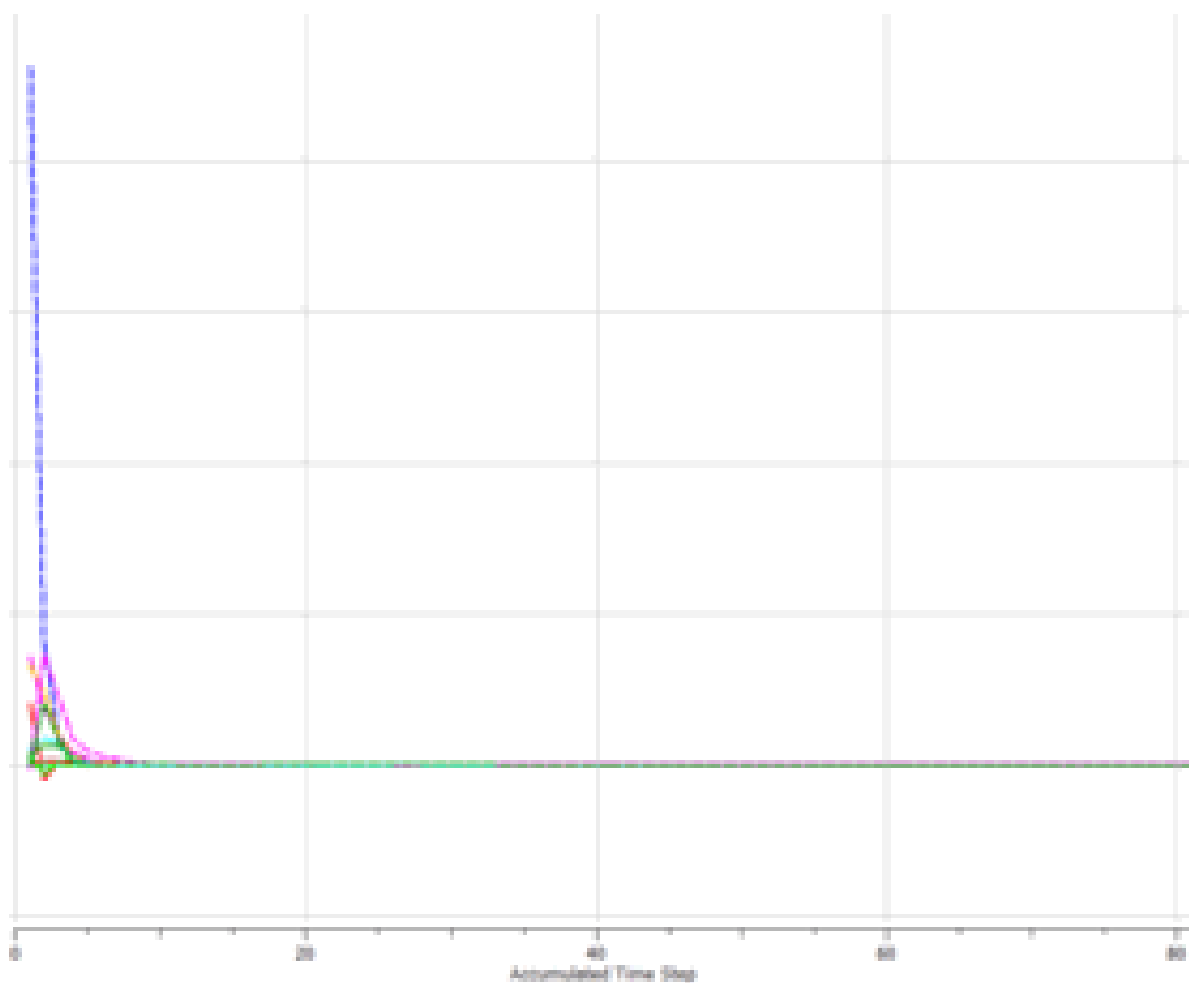


Рис. 2.10 Сходимость расчета рабочего колеса

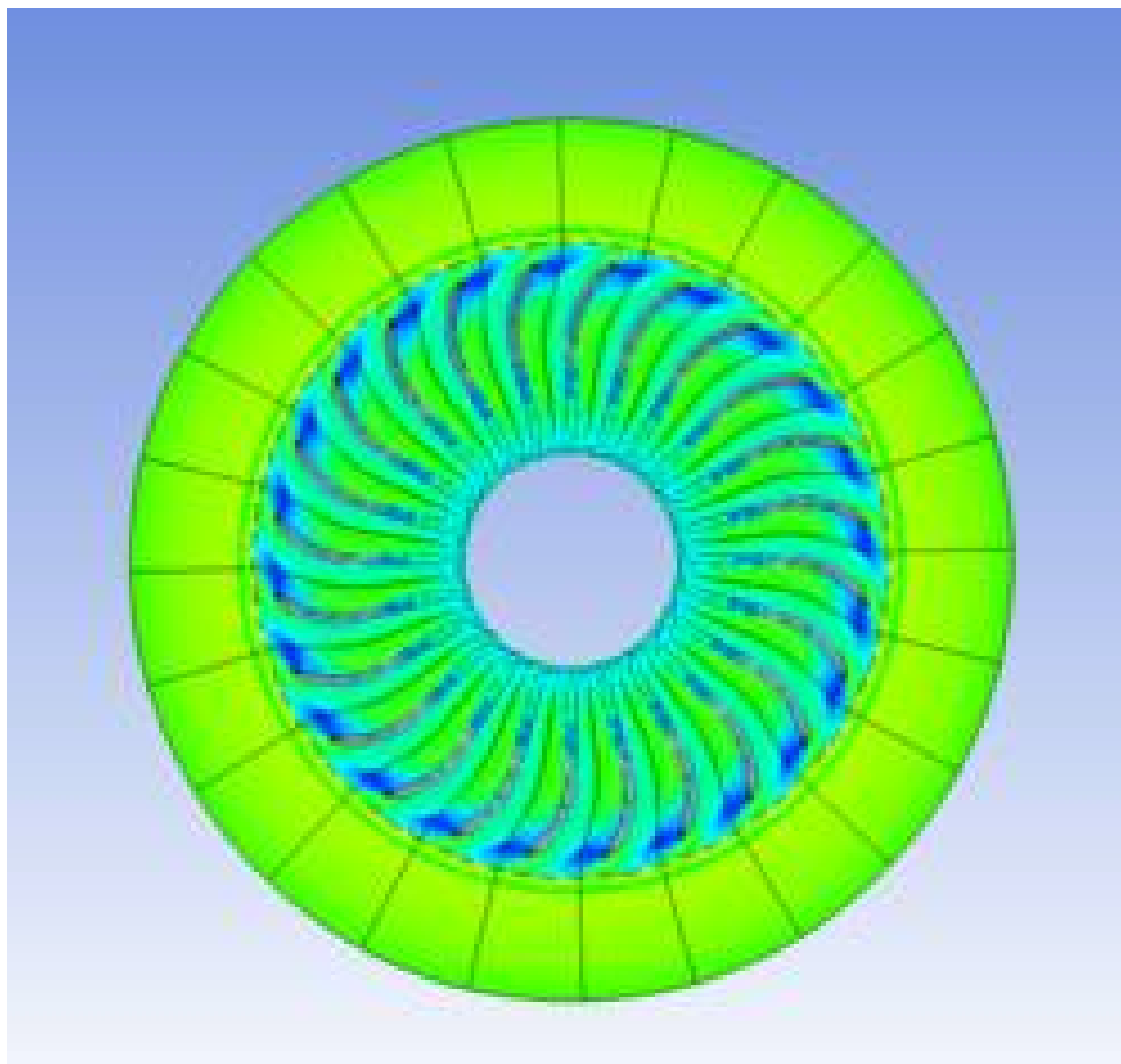


Рис. 2.11 Пример течений в рабочем колесе

2.3 Расчет всей ступени компрессора

После расчета рабочего колеса начинаем считать всю ступень целиком, модели импортируются в модуль «CFX» и соединяются с помощью интерфейсов, там же задаются плоскости вращения. Считаем, как и в случае рабочего колеса 4 массовых расхода. Фактор сходимости оставляем равным 100, а условия по максимальному отклонению мы смягчаем, так как расчет более сложный и состоит из нескольких соединённых частей, в этом случае погрешности не избежать, но будут они невелики, не более чем 3 знака после запятой.

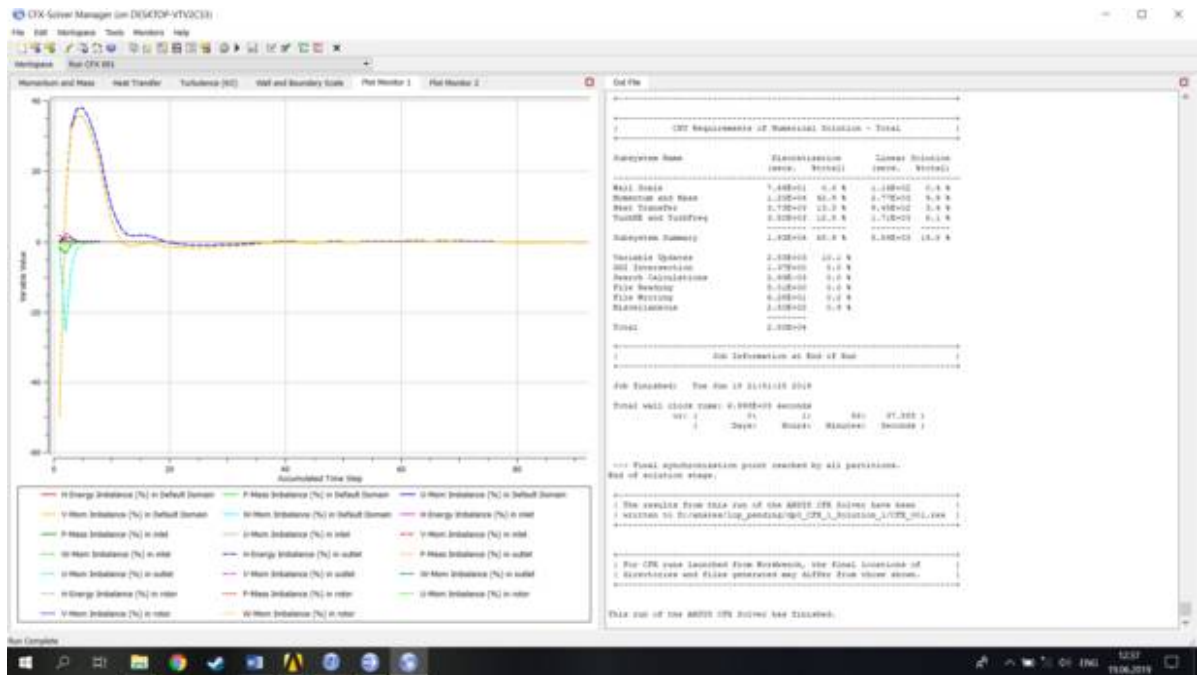


Рис. 2.12 Сходимость расчета ступени целиком

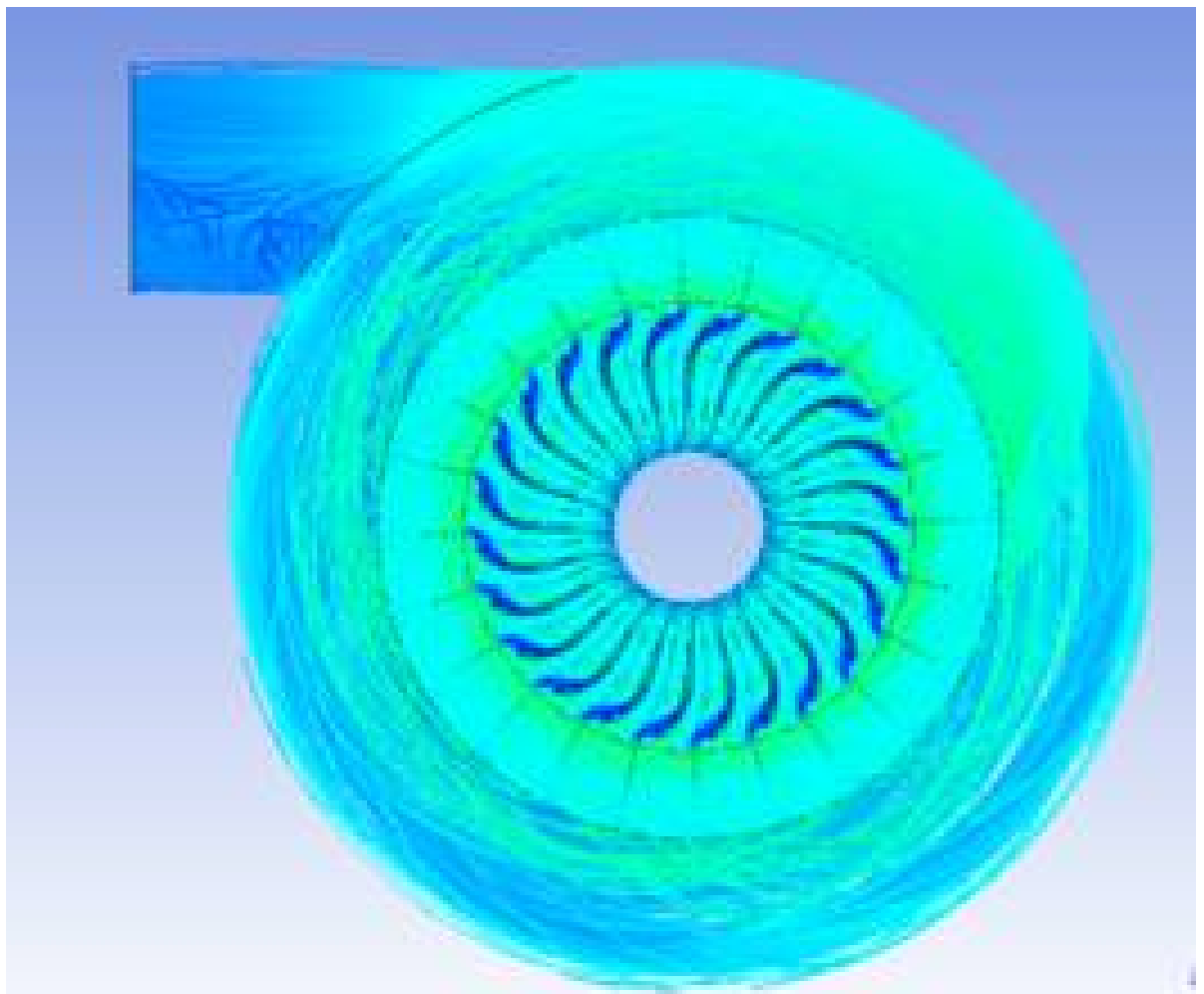


Рис. 2.13 Пример течений в сборе

На графике сходимости видно, что значительные нестыковки прошли только к 40 итерации, в то время как при расчете отдельно рабочего колеса, тот же результат был достигнут уже на 10, а время на достижения минимальных потерь так же короче, при расчете на одинаковых заданных параметрах.

2.5 Обработка результатов численного моделирования

На данном этапе, после получения сходимости в расчете мы открываем его результаты и с помощью команд получаем интересующие нас значения с целью сравнения их с методикой НЗЛ и программой SAPRM.

Таблица 2.13

Массовый расход $m = 10$ кг/с

	m	P*	P	T	T*
0-0	9.939 [kg s ⁻¹]	6298040 [Pa]	6275410 [Pa]	305.858 [K]	306.142 [K]
1-1	-9.949 [kg s ⁻¹]	6346060 [Pa]	6245190 [Pa]	306.335 [K]	307.598 [K]
2-2	-9.939 [kg s ⁻¹]	8451660 [Pa]	7620250 [Pa]	324.459 [K]	332.782 [K]
4-4	-9.935 [kg s ⁻¹]	8153940 [Pa]	7766690 [Pa]	327.389 [K]	331.368 [K]

Таблица 2.14

Массовый расход $m = 12$ кг/с

Сечение	Н	0	2	4	к
Статическое давление P, Па	5620370	5600370	6906260	7397660	7570808
Полное давление P*, Па	5637480	5657480	8236990	7773540	7634352
Температура T, К	282,84	282,71	298,47	308,82	304,32
Полная Температура T*, К	283,15	283,15	308,59	308,2	304,87

Таблица 2.15

Массовый расход $m = 14$ кг/с

Сечение	Н	0	2	4	к
Статическое давление Р, Па	5614170	5594170	6835400	7238360	7412658
Полное давление Р*, Па	5636140	5656140	8152580	7691770	7486855
Температура Т, К	282,76	282,45	297,67	307,24	302,21
Полная Температура Т*, К	283,15	283,15	307,77	307,38	302,95

Таблица
2.1
6

Массовый расход $m = 16$ кг/с

Сечение	Н	0	2	4	к
Статическое давление Р, Па	5606840	5586840	6811270	7107000	7328757
Полное давление Р*, Па	5634170	5654170	8129320	7657980	7407137
Температура Т, К	282,67	282,12	297,15	305,75	301,09
Полная Температура Т*, К	283,15	283,15	307,28	306,85	302,05

ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ЛОПАТОЧНОГО ДИФФУЗОРА

Деталь требуется спроектировать с горизонтальным разъемом для удобства закрепления на роторе. Для этого заготовку разрезается на 2 равные части, которые скрепляются между собой штифтами. Поверхности разъема должны быть хорошо обработаны, для этого применяется плоское шлифование, а для отверстий под штифты развертывание.

Также, после удаления материала при резании и шлифовании заготовка будет обладать овальной формой, для получения конечной внутренней и цилиндрической формы нужно провести токарную чистовую обработку. Но возникает проблема закрепления заготовки при обработки внешней цилиндрической поверхности из-за появившегося разъема. Для решения этой проблемы делаются специальные сварочные прихватки, которые будут сточены в ходе обработки внутренней цилиндрической поверхности.

Последний этап будет удобно проводить на координатно-фрезерном станке с ЧПУ, так как требуется проточить 25 межлопаточных канала.

В качестве заготовки была выбрана поковка, материал Сталь 40Х.

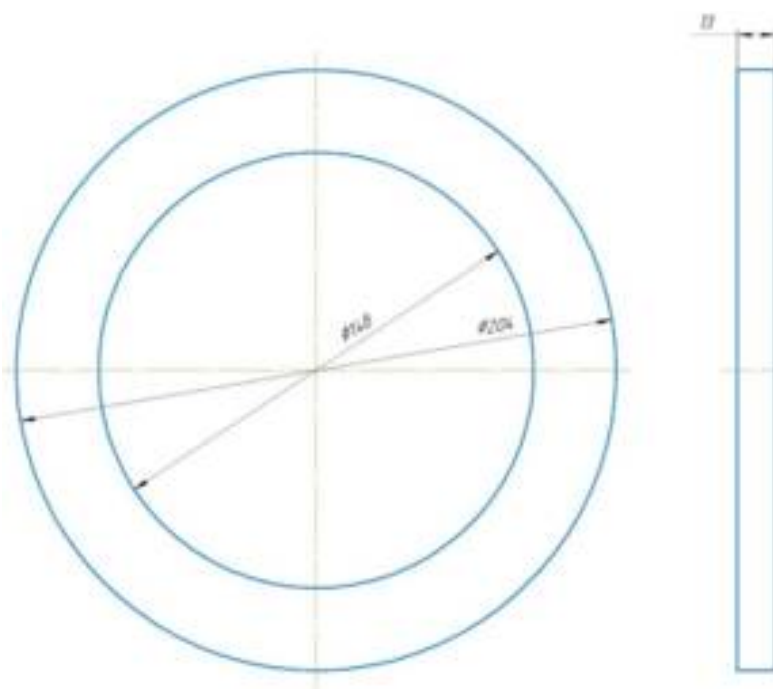


Рис. 3.1. Заготовка детали

Маршрутно-технологическая карта			
№ п/п	Наименование операции	Краткое содержание	Оборудование
00	Заготовительная	Поковка заготовки	
05	Токарная (черновая)	Точение цилиндрических поверхностей с припуском 2,5; 3 мм на сторону	Токарно-винторезный станок
10	Фрезерная	Резание заготовки на 2 части	Горизонтально-фрезерный станок
15	Шлифовальная	Шлифование плоских поверхностей	Шлифовальный станок
20	Сверлильная	Сверление и развертывание двух отверстий	Радиально-сверлильный станок
25	Слесарная	Установка штифтов	
30	Сварочная	Прихватка двух заготовок	
35	Токарная (чистовая)	Точение цилиндрических поверхностей $\varnothing 156$ и $\varnothing 196$	Токарно-винторезный станок
40	Фрезерная	Фрезерование межлопаточных каналов	Фрезерно-копировальный станок с ЧПУ

Операционно-технологическая карта

Операция	Установ	Позиция	Переход	Содержание перехода	Инструмент		Приспособление
					Режущий	Мерительный	
05	А	II	1	Установить, закрепить, снять			Четырехкулачковый патрон
			2	Точить цилиндрическую поверхность $\varnothing 206$ мм с припуском 3 мм на сторону на длину $l=13$ мм	Прямой проходной резец	Штангенциркуль	
			3	Подрезка торца с припуском 2,5 мм	Проходной резец с отогнутой головкой	Штангенциркуль	
05	Б	III	4	Переустановить, закрепить			
			5	Точить внутреннюю цилиндрическую поверхность $\varnothing 148$ мм с припуском 3 мм на сторону на длину $l=10,5$ мм	Расточной проходной резец	Штангенциркуль	
			6	Подрезка торца с припуском 3 мм	Проходной резец с отогнутой	Штангенциркуль	

					ГОЛОВКОЙ		
--	--	--	--	--	----------	--	--

Токарная черновая операция представлена на рис. 3.2.

Операция 05 Установ А

Операция 05 Установ Б

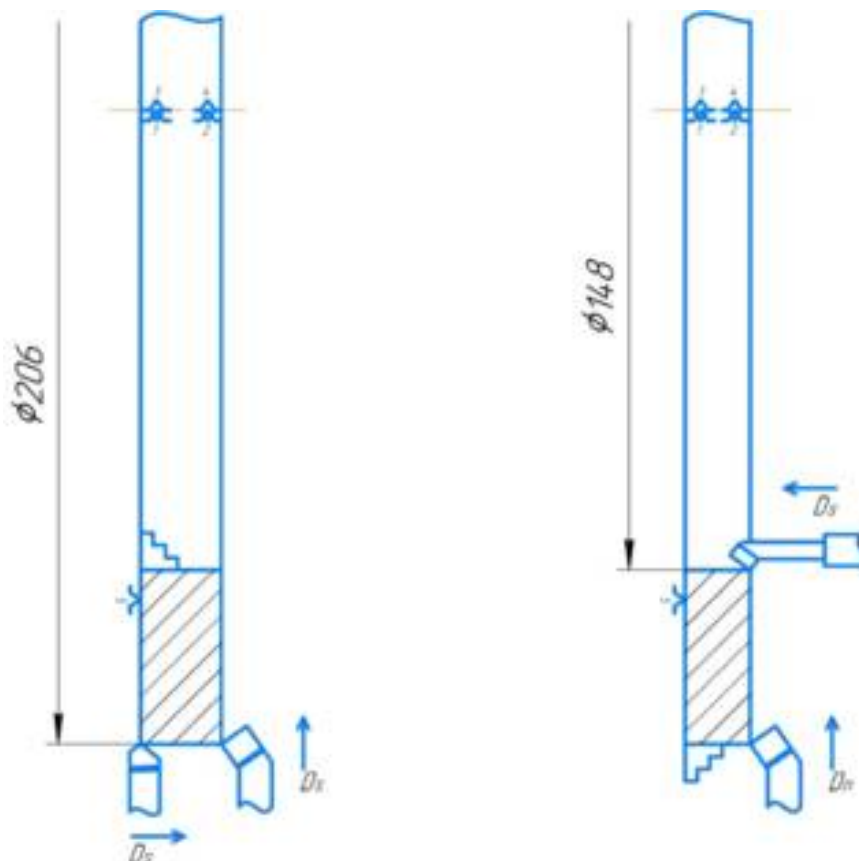


Рис. 3.2 Токарная черновая операция

Таблица 3.3

Операционно-технологическая карта

Операция	Установ	Позиция	Переход	Содержание перехода	Инструмент		Приспособление
					Режущий	Мерительный	
10	А	IV	7	Установить, закрепить, снять			Тиски
			8	Разрезать деталь на 2 части	Дисковая отрезная	Штангенцир	

					фреза	-куль	
--	--	--	--	--	-------	-------	--

Фрезерная операция представлена на рис. 3.3.

Операция 10 Установ А

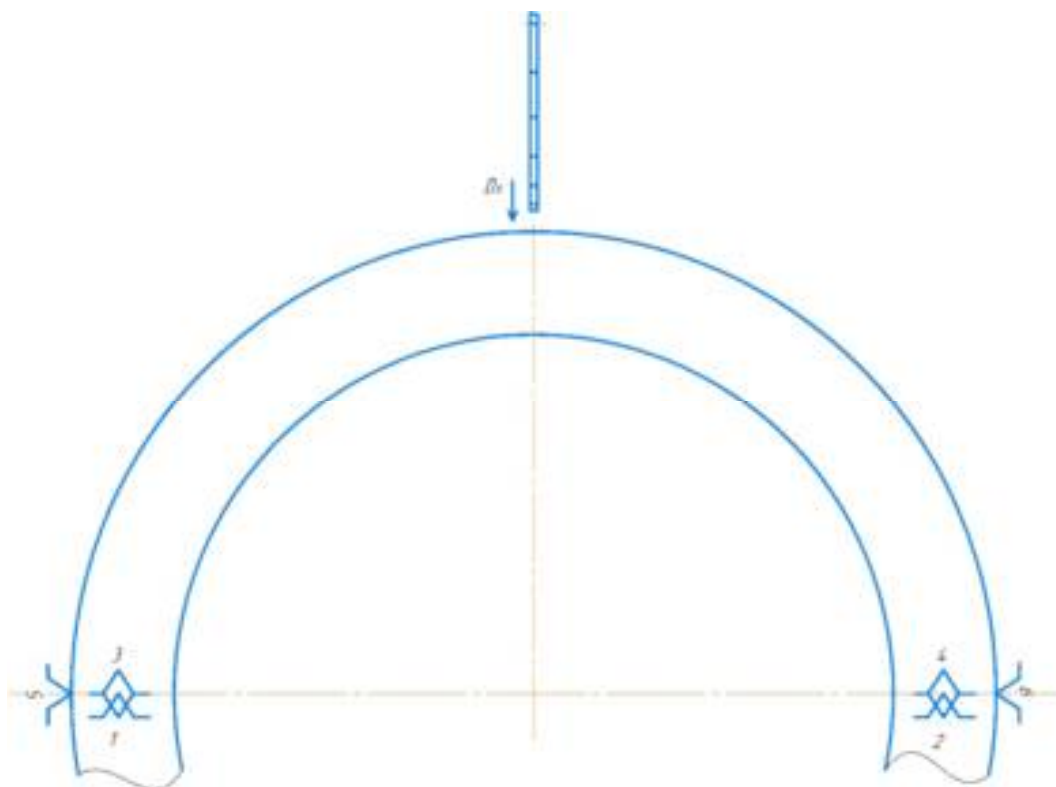


Рис. 3.3 Фрезерная операция

Таблица 3.4

Операционно-технологическая карта

Операция	Установ	Позиция	Переход	Содержание перехода	Инструмент		Приспособление
					Режущий	Мерительный	
15	А	V	9	Установить, закрепить, снять			Тиски
			10	Шлифовать поверхности с припуском в 0,1 мм	Шлифовальный		

					круг	
--	--	--	--	--	------	--

Шлифовальная операция представлена на рис. 3.4.

Операция 15 Установ А

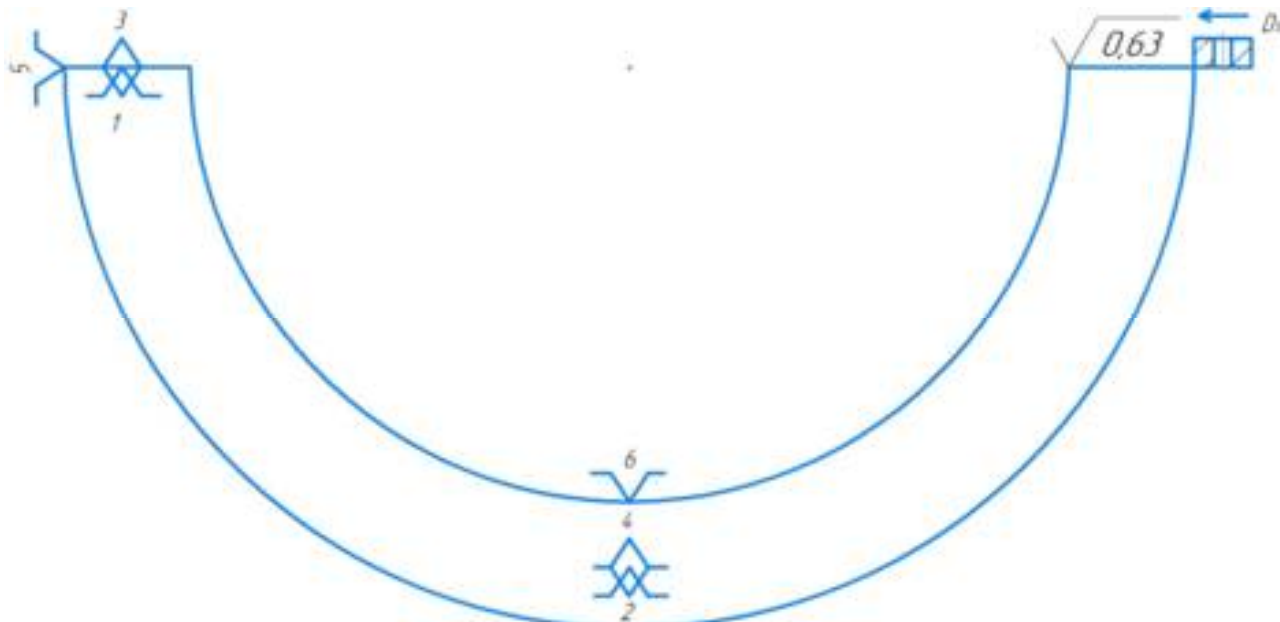


Рис. 3.4 Шлифовальная операция

Таблица 3.5

Операционно-технологическая карта

Операция	Установ	Позиция	Переход	Содержание перехода	Инструмент		Приспособление
					Режущий	Мерительный	
20	А	VI	11	Установить, закрепить, снять			Тиски
			12	Сверлить отверстия $\varnothing 3$ мм на глубину 5 мм	Сверло	Штангенциркуль	
			13	Развертывание отверстий	Развертка		

Сверлильная операция представлена на рис. 3.5.

Операция 20 Установ А Операция 20 Установ Б

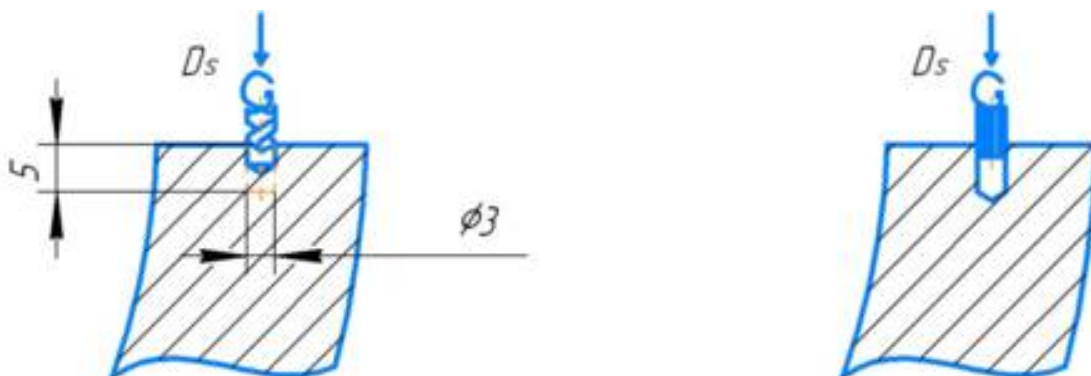


Рис. 3.5 Сверлильная операция

Таблица 3.6

Операционно-технологическая карта

Операция	Установ	Позиция	Переход	Содержание перехода	Инструмент		Приспособление
					Режущий	Мерительный	
25	А	VII	14	Установить, закрепить, снять			Тиски
			15	Установка двух штифтов			

Таблица 3.7

Операционно-технологическая карта

Операция	Установ	Позиция	Переход	Содержание перехода	Инструмент		Приспособление
					Режущий	Мерительный	
30	А	VII	16	Установить, закрепить, снять			Тиски

			17	Прихватить две заготовки			
--	--	--	----	--------------------------	--	--	--

Таблица 3.8

Операционно-технологическая карта

Операция	Установ	Позиция	Переход	Содержание перехода	Инструмент		Приспособле- -ние
					Режущий	Мерите льный	
35	А	VIII	18	Установить, закрепить, снять			Четырехку- лачковый патрон
			19	Точить цилиндрическую поверхность в окончательный размер Ø196 на длину l=8 мм	Прямой проход- ной резец	Штан- генцир- куль	
	Б	IX	20	Переустановить, закрепить			
			21	Точить внутреннюю цилиндрическую поверхность в окончательный размер Ø156 на длину l=6,8 мм	Расточной проход- ной резец	Штан- генцир- куль	
			22	Подрезка торца с припуском 1,2 мм	Проход- ной резец с отогну-той головкой	Штан- генцир- куль	
	В	X	23	Установить, закрепить, снять			

		24	Подрезка торца с припуском 1,2 мм	Проходной резец с отогнутой головкой	Штангенциркуль	
--	--	----	-----------------------------------	--------------------------------------	----------------	--

Токарная чистовая операция представлена на рис. 3.6.

Операция 35 Установ А

Операция 35 Установ Б

Операция 35 Установ В

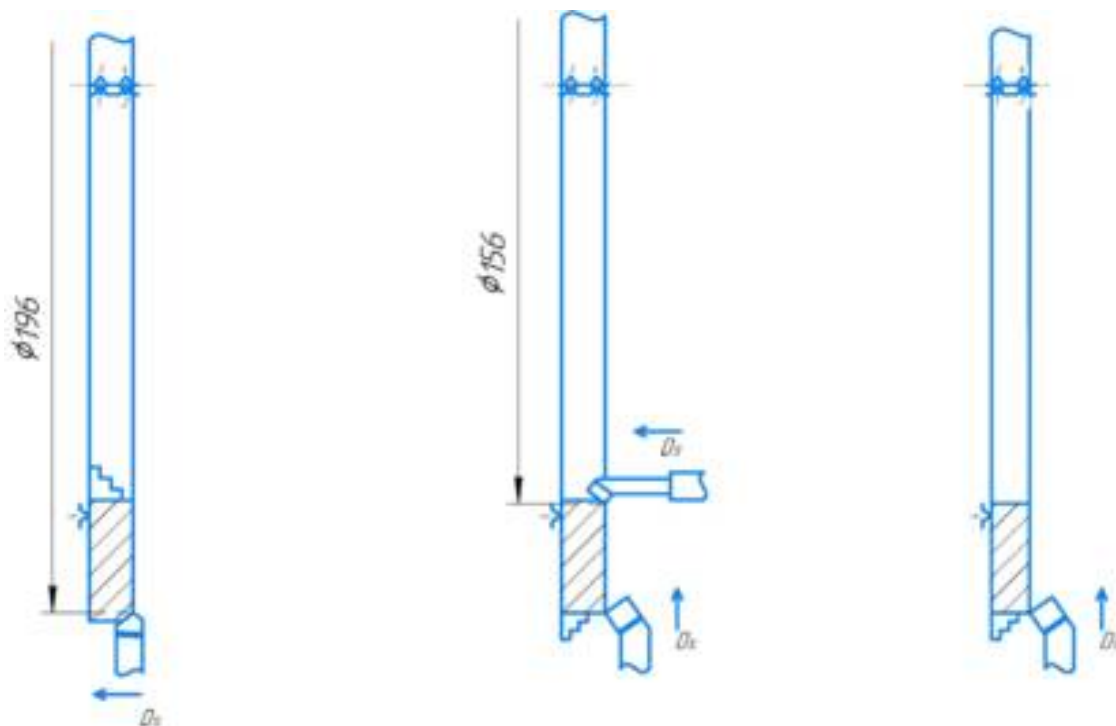


Рис. 3.6 Токарная чистовая операция

Таблица 3.9

Операционно-технологическая карта

Операция	Установ	Позиция	Переход	Содержание перехода	Инструмент		Приспособление
					Режущий	Мерительный	
40	А	XI	25	Установить, закрепить, снять			Тески
			26	Черновая фрезеровка 25 межлопаточных каналов по контуру	Пальчиковая фреза		

		27	Чистовая фрезеровка 25 межлопаточных каналов по контуру	Пальчиковая фреза	
		28	Снять деталь		

Токарная чистовая операция представлена на рис. 3.7.

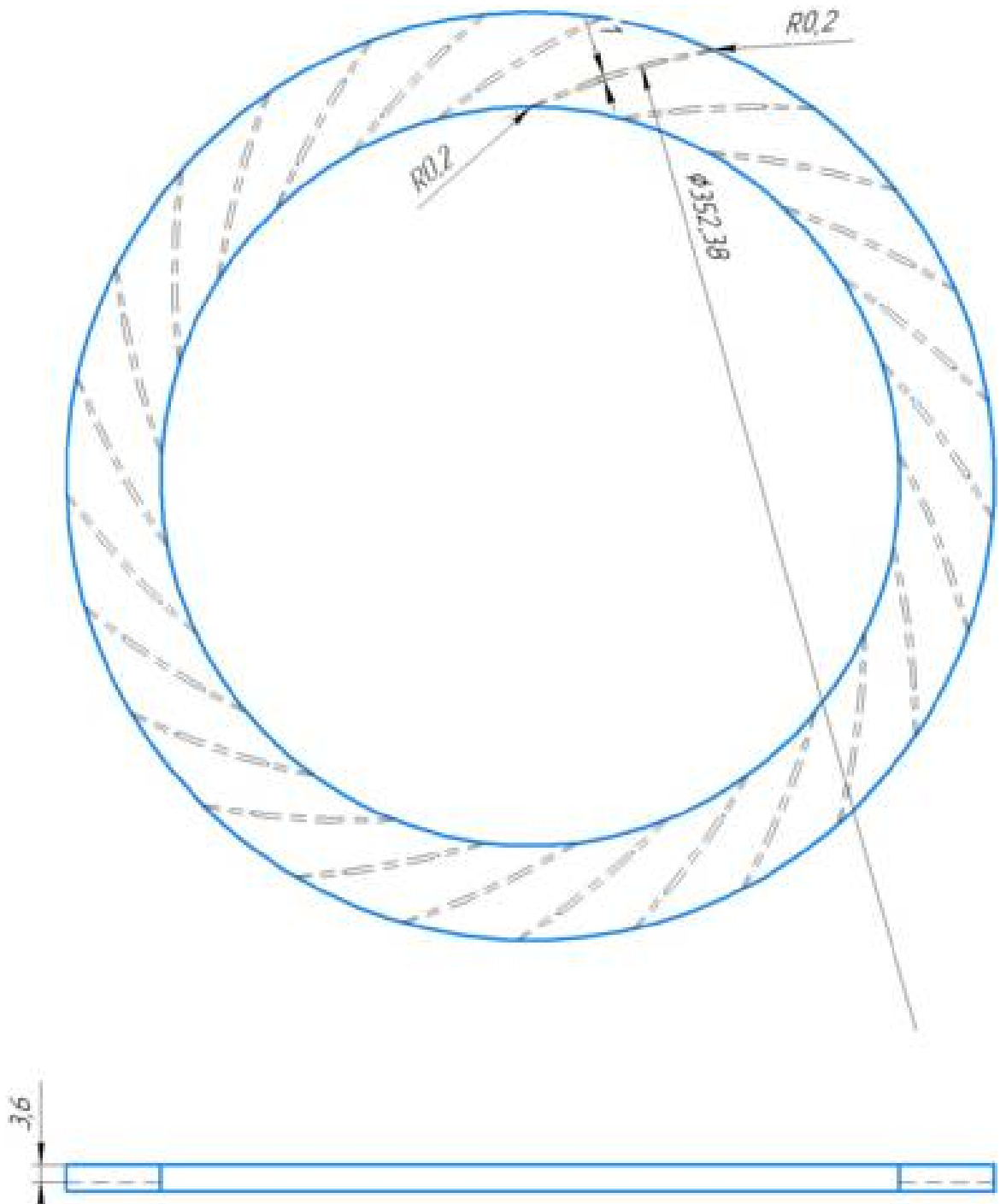


Рис. 3.7 Токарная чистовая операция

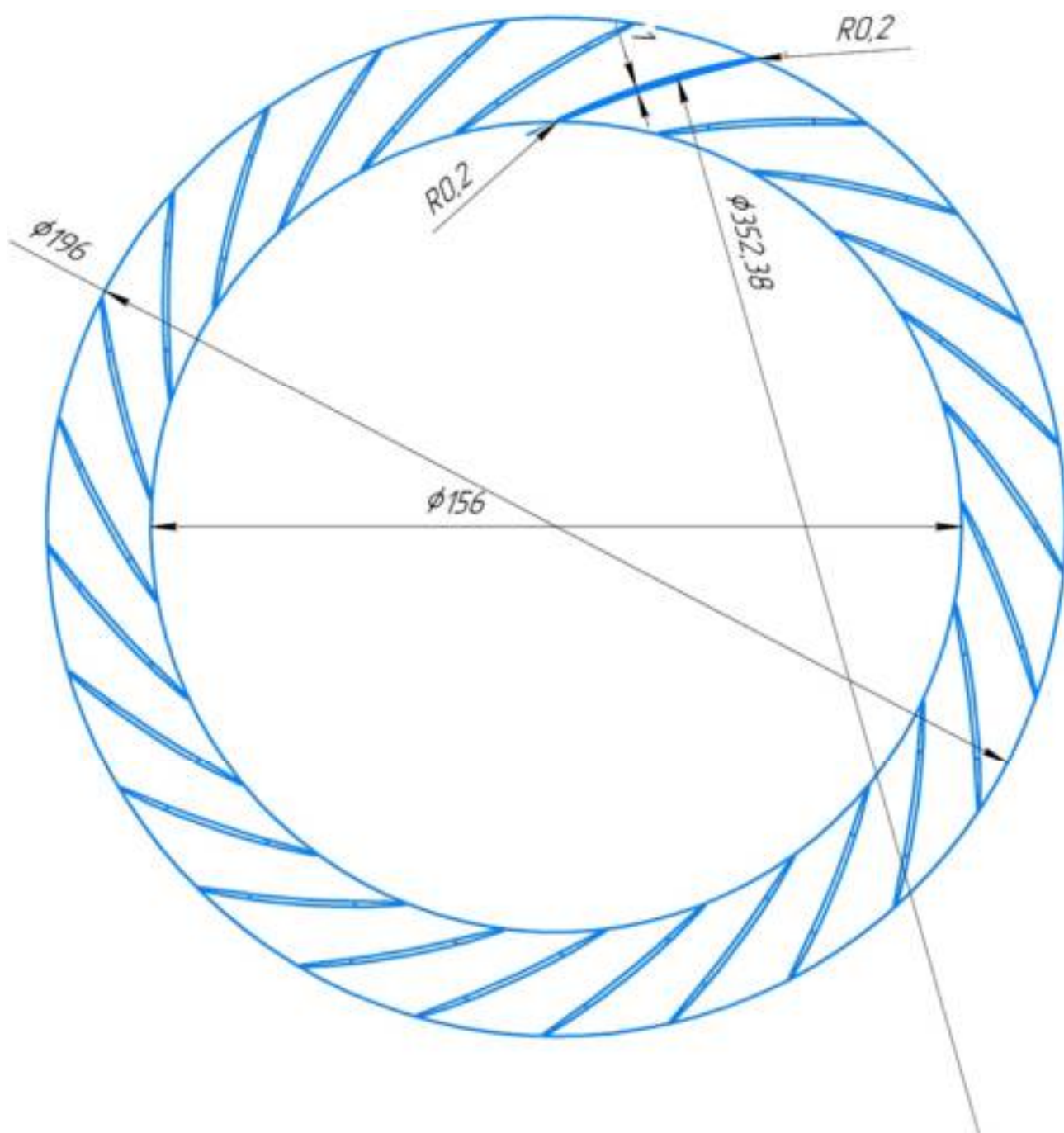


Рис. 3.8 Итоговая деталь

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной выпускной квалификационной работы были сравнены два метода расчета газодинамических параметров центробежного компрессора.

Первично по начальным параметрам с помощью программы “SAPR”, созданной на базе кафедры «КВиХТ» СПбПУ им. Петра Великого, были получены геометрические параметры рабочего колеса, входного и выходного устройств, они были сопоставлены с расчетом по методике НЗЛ и было выявлено что эти параметры сопоставимы. Было решено выбрать сборную камеру постоянного сечения в качестве выходного устройства. Далее опыт проводился в программно-инженерном комплексе ANSYS Workbench 16.2.

Таким образом можно сказать, что ANSYS CFX отлично подходит для моделирования экспериментов центробежного компрессора, а также его можно использовать для оптимизации компрессора, например подбором лопаточного диффузора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smith I. K, Stosic N and Kovacevic A, 2001 Use of Screw Machines as a Throttle Valve Replacement in Refrigeration Plants, Journal of Mechanical Engineering, 47(8)484.
2. Журнал компрессоры и пневматика, сжатый воздух: основы расчета. URL: <https://www.fiak.ru/upload/medialibrary/169/169cd7003e6afe81faf8e62b5cdd34ea.pdf> (дата обращения 05.06.2019)
3. Air Compressor for Pharmaceutical Plant [электронный ресурс] URL: <https://www.quincycompressor.com/industries/pharmaceutical/> (дата обращения 01.06.2019)
4. АО «РЭП Холдинг» [электронный ресурс] URL: <https://www.reph.ru/production/type/30/211/> (дата обращения 31.05.2019)
5. Ваняшов А.Д., Кустиков Г.Г. Расчет и конструирование центробежных компрессорных машин: Учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. – 208 с
6. Ansys 18.0 Workbench Tutorial
7. Ю.В. Кожухов, Л.В. Гилева Исследование всасывающей камеры центробежного компрессора методами вычислительной газодинамики с проверкой модели на сеточную независимость.