

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Физико-механический институт
Высшая школа теоретической механики и математической физики

Работа допущена к защите

Директор ВШТМиМФ,

д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН

А. М. Кривцов

« ____ » _____ 2022 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

магистерская диссертация

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШЕСТЕРЕНЧАТОГО НАСОСА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВОСКОПОДОБНЫХ ВЕЩЕСТВ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

по направлению подготовки

01.04.03 «Механика и математическое моделирование»

Направленность

01.04.03_03 Механика и цифровое производство

Выполнил студент

гр. 5040103/00301

В.С. Брылев

Руководитель., к.ф.-м.н.,

доцент ВШТМиМФ

П.А. Дятлова

Санкт-Петербург

2022

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПЕТРА ВЕЛИКОГО**

**Физико-механический институт
Высшая школа теоретической механики и математической физики**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ВШТМиМФ

А.М. Кривцов

« » _____ 2022 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы

студенту Брылеву Валерию Станиславовичу, группы 5040103/00301
фамилия, имя, отчество (при наличии), номер группы

1. Тема работы: Проектирование шестеренчатого насоса для создания изделий из воскоподобных веществ с помощью аддитивных технологий.
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 01.06.2022.
3. Исходные данные по работе: справочная литература, актуальные публикации по теме исследования.
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): исследовать принцип действия шестеренчатого насоса, выбрать геометрические характеристики шестеренок для исследования, провести сравнительный анализ выбранных шестеренок, спроектировать модель шестеренчатого насоса.
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): не предусмотрены
6. Консультанты по работе: не предусмотрены
7. Дата выдачи задания 13.05.2022.

Руководители ВКР

_____ (подпись)

П.А. Дятлова

_____ инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению 13.05.2022.

_____ (дата)

Студент

_____ (подпись)

В.С. Брылев

_____ инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

На 45 с., 43 рисунка, 4 таблицы

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ШЕСТЕРЕНЧАТЫЙ НАСОС, ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Тема выпускной квалификационной работы: «Проектирование шестеренчатого насоса для создания изделий из воскоподобных веществ с помощью аддитивных технологий»

Целью работы является моделирование опытного образца экструдера, созданного на базе шестеренчатого насоса. Предметом исследования являются геометрические характеристики рабочего органа экструдера – шестеренок. Задачи, решаемые в ходе исследования:

1. Исследование принципов работы шестеренчатого насоса.
2. Анализ рынка подобного оборудования.
3. Выбор геометрических параметров шестеренок для исследования.
4. Анализ подобранных шестеренок с применением метода конечно-элементного моделирования.
5. Создание модели опытного образца экструдера.

В ходе работы был исследован механизм действия шестеренчатого насоса, проведен численный анализ шестеренок, выявлены параметры, отвечающие за производительность экструдера при наложении геометрических ограничений.

В результате работы была разработана модель опытного образца экструдера.

ABSTRACT

45 pages, 43 figures, 4 tables

KEYWORDS: GEAR PUMP, DIE CASTING, MODELING, ADDITIVE TECHNOLOGIES

The topic of the graduate qualification work is « Modeling of a gear pump for creating waxy products using additive technologies ».

The purpose of the work is to simulate a prototype extruder created based on a gear pump. The subject of the study is the geometric characteristics of the working body of the extruder – gears. The research set the following goals:

1. Investigation of the principles of operation of a gear pump.
2. Market analysis of similar equipment.
3. Selection of geometric parameters of gears for research.
4. Analysis of selected gears using the finite element modeling method.
5. Creating a prototype model of an extruder.

In the course of the work, the mechanism of action of the gear pump was investigated, a numerical analysis of the gears was carried out, the parameters responsible for the performance of the extruder when geometric constraints are imposed were identified.

As a result of the work, a model of a prototype extruder was developed.

Содержание

Введение.....	5
Глава 1. Анализ рынка восковой печати.....	7
Глава 2. Принцип работы шестеренчатого насоса	12
2.1 Шестеренчатый насос внешнего зацепления	12
2.2 Шестеренчатый насос внутреннего зацепления.....	14
Глава 3. Выбор параметров зубчатых колес для расчета.....	16
Глава 4. Численный расчет производительности экструдера	19
4.1 Расчет шестеренки №1	19
4.2 Расчет шестеренки №2.....	25
4.3 Расчет шестеренки №3.....	30
Глава 5. Анализ полученных результатов	35
Глава 6. Проектирование шестеренчатого экструдера	38
Заключение	42
Список использованной литературы.....	43

Введение

Аддитивные технологии (АТ) являются одной из самых быстрорастущих сфер современной высокотехнологичной промышленности. Одним из важнейших направлений по развитию АТ является применение новых материалов для создания сложнопрофильных изделий с помощью 3D печати.

Исследование, проводимое в рамках магистерской работы, направлено на создание научно-технического задела для решения прикладных научно-исследовательских задач в сфере АТ, в частности ряда работ по разработке автоматической системы подачи и предварительной подготовки вязких материалов для 3D печати изделий по технологии FDM (метод послойного наплавления).

Разрабатываемая технология позволит упростить процесс изготовления изделий из различных вязких материалов и уменьшить затраты в сравнении с существующими технологиями 3D печати. В настоящий момент в сфере аддитивных технологий отсутствуют решения для печати вязкими воскоподобными материалами по технологии FDM с учетом необходимых температурных условий и режимов подготовки материалов.

В ходе работы будут представлены инновационные цифровые подходы по исследованию поведения вязких материалов (воск) при различных механических воздействиях. По итогам исследований будет создана новая автоматическая система подготовки и подачи материала, интегрированная с 3D печатью по технологии FDM. Интегрированная система будет включать инновационные узлы для подачи материала, в том числе автоматическую систему плавления и перемешивания материала, систему подачи на базе шестеренчатого экструдера, систему контроля температурного режима для обеспечения высокой точности работы. Новый подход к 3D печати воском и

парафином позволит разработать экономически оправданную технологию, обеспечивающую высокое качество изготавливаемых изделий.

Разрабатываемая технология найдет широкое применение в сфере АТ и будет востребована для изготовления изделий из вязких материалов в различных сферах промышленности. Технология 3D печати воском применяется в ювелирной, медицинской и автомобильной промышленности. Изготовление восковых моделей с помощью аддитивных технологий является частью технологической цепочки по созданию изделий методом литья по выплавляемым моделям [1].

Существующие технология 3D печати воском являются недоступными для большинства малых и средних предприятий ввиду высокой стоимости зарубежных 3D - принтеров и специализированных материалов.

В ходе выполнения проекта будет разработана технология, позволяющая решать аналогичные задачи с меньшими затратами, что впоследствии позволит предприятиям эффективно использовать инновационную разработку для решения широкого класса задач.

Глава 1. Анализ рынка восковой печати

В настоящий момент на рынке восковой печати представлены в основном зарубежные компании, реализующие различные технологии в процессе печати воскоподобными материалами. Рассмотрим основные методы печати и компании, реализующие данные технологии.

1) Послойное наплавление — FDM

Рабочим материалом при использовании данной технологии могут являться различные виды пластика в виде нити, в том числе возможно использование тугоплавкого литейного воска. Принцип печати восковыми филаментами принципиально не отличается от печати стандартными пластиками (ABS, PLA, PETG). Печать происходит послойно, пруток поступает в экструдер, нагревается до температуры плавления и, проходя через сопло, формирует слой передвигаясь в координатах XY (см. рис. 1.1). По завершении слоя происходит смещение по оси Z, после чего процесс повторяется на новом слое, так и происходит образование объемной модели.

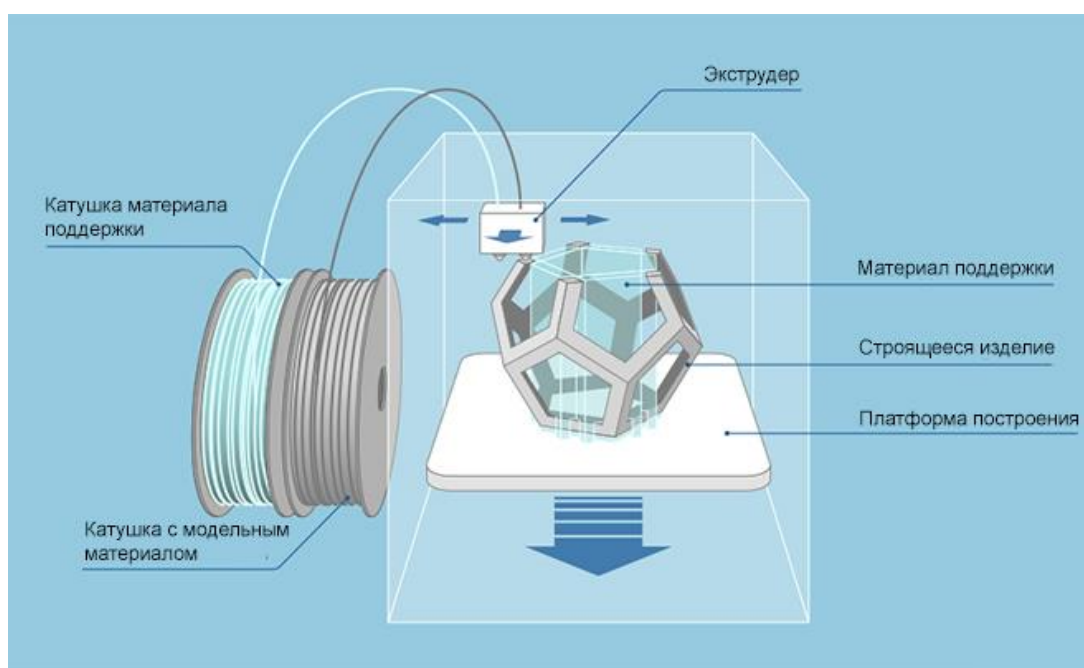


Рисунок 1.1 - Составные элементы принтера для FDM печати

Для печати восковок по технологии FDM используют специальный воскоподобный пластик, например такой как WAX 3D от отечественного

производителя расходных материалов Filamentarno!. Стоимость катушки материала массой 2кг на сайте производителя составляет 7800 рублей. [12]. Оборудование для печати материалом WAX 3D не регламентировано, но производитель рекомендует к использованию принтер Designer X Pro от компании Picaso стоимостью 359000 рублей [7]

2) Технология многоструйной печати — MJM (MJP)

Multi Jet Modeling (Multi Jet Printing) — метод аддитивного производства, запатентованный компанией 3D Systems, основанный на многоструйном моделировании (см. рис. 1.2), с использованием восковых или фотополимерных материалов.

В основе технологии лежит метод струйной печати, но модернизированный увеличением количества сопел. На печатающей головке находится массив мелких сопел, количество которых может варьироваться от 96 до 448 в зависимости от модели принтера.

Печатающая головка движется вдоль рабочего стола и наносит слой жидкого полимера, вслед за головкой двигается ультрафиолетовая лампа, засвечивающая нанесенный слой материала. После затвердевания нанесенного слоя, печатающая головка поднимается относительно рабочего стола, и процесс повторяется слой за слоем, пока печать модели не будет завершена.

Помимо основных материалов в процессе печати могут использоваться вспомогательные материалы (материалы поддержки), например VisiJet S300. Это восковой филамент, являющийся опорой для выступающих частей модели. Температура плавления данного материала меньше температуры плавления основных материалов, поэтому после окончания печати восковые поддержки выплавляются без ущерба для геометрии основной модели.

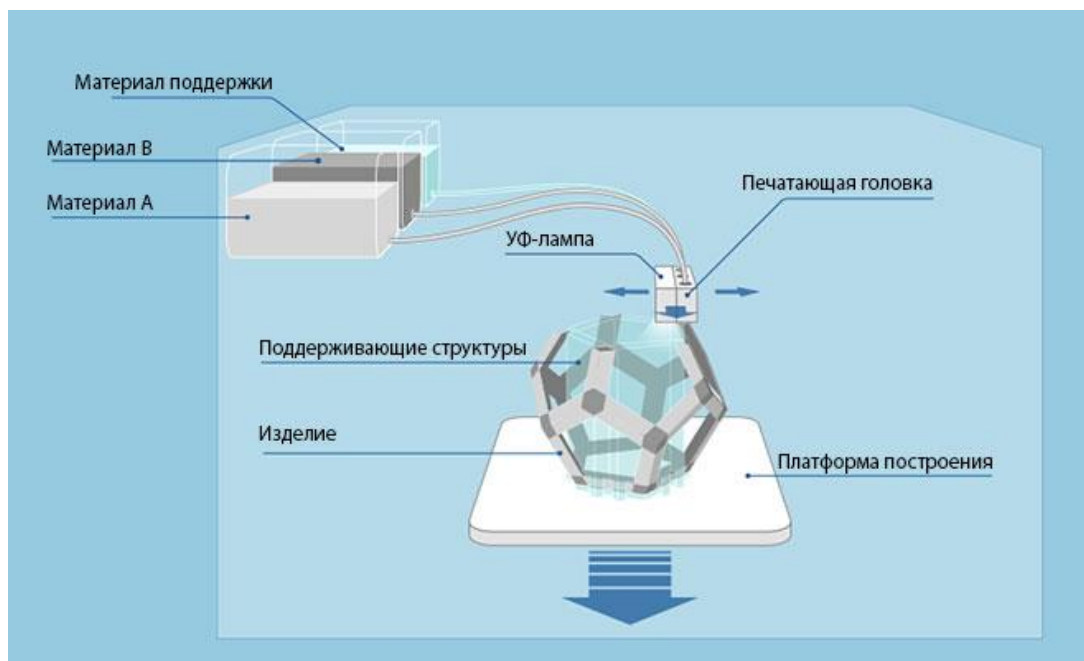


Рисунок 1.2 - Составные элементы принтера для MJM печати

Основными преимуществами данного вида печати можно называть высокое качество готовых изделий за счет высокого разрешения печати и поддержек, которые можно отделить от изделия без механического воздействия; многофункциональность, так как выбор используемых материалов не ограничен восковыми материалами, фотополимерные материалы также доступны к использованию; использование более одного основного материала при печати создает возможность как печати одной модели разными материалами, так и многоцветной печати одним материалом.

В качестве примера оборудования, работающего по технологии многоструйной печати, можно привести 3D-принтер ProJet MJP 2500W. Стоимость данного принтера в данный момент составляет порядка 4млн рублей [9], стоимость расходного материала VisiJet M3 Procast составляет 138317 рублей за картридж массой 2кг [13].

3) 3D-печать по технологии DoD

DoD (Drop on Demand) — технология, похожая на MJM, но вместо ультрафиолетовой лампы для засвечивания полимера используется фреза для

корректировки слоя после нанесения основного материала и материала поддержки (см. рис 1.3).

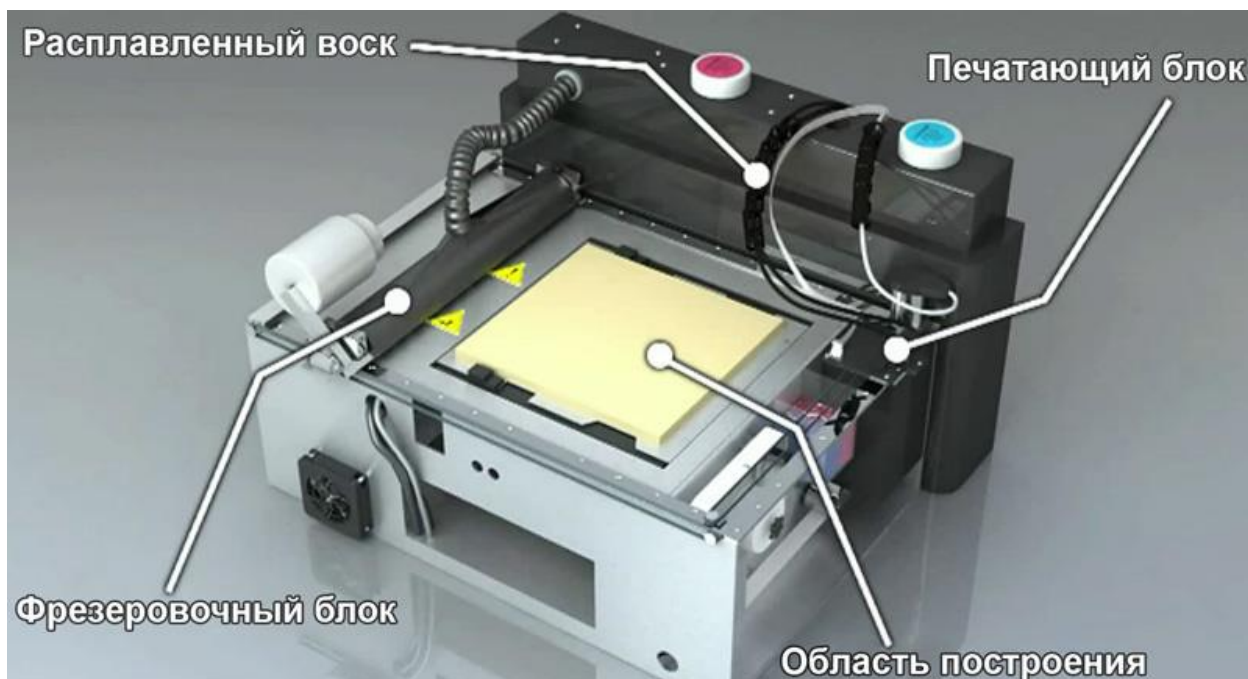


Рисунок 1.3 - Составные элементы принтера для DoD печати

В процессе печати расплавленный воск под давлением подается в набор мельчайших сопел, слой формируется перемещением печатной головки над рабочей областью. После формирования слоя фреза выравнивает нанесенный материал, формируя гладкую поверхность для печати следующего слоя (см. рис. 1.4б).

В качестве примера оборудования, работающего по технологии DOD можно привести 3D-принтер SolidScape 3Z PRO компании SolidScape. Стоимость данного принтера составляет 4130000 рублей [8]. Расходным материалом для данного принтера является проприетарный 3D-печатный воск, такой как Solidscape 3Z Model для печати моделей и Solidscape 3Z Support для поддержек, стоимость которых составляет 380\$ [10] и 330\$ [11] соответственно.

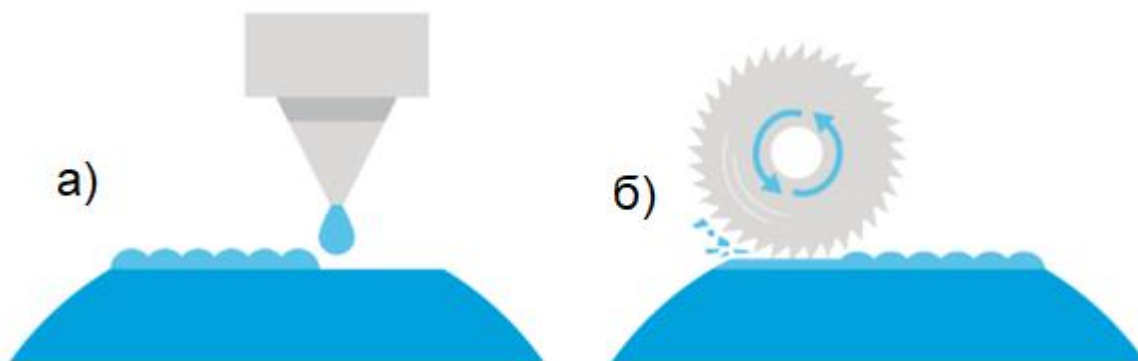


Рисунок 1.4 - Процесс печати методом DoD
а) нанесение материала б) формирование слоя фрезой

Глава 2. Принцип работы шестеренчатого насоса

2.1 Шестеренчатый насос внешнего зацепления

Шестеренчатый насос [6] с внешним зацеплением часто используется в качестве масляного насоса в разнообразных типах двигателей, а также в качестве смазочных насосов в силовом оборудовании и станках.

Рабочими органами данного насоса являются шестерни, которые находятся в постоянном зацеплении. Шестерни в насосе могут располагаться, как в несколько рядов, так и одиночными парами. Используемые типы зацепления зубчатых колес в шестеренчатых насосах внешнего зацепления (см. рис. 2.1):

- Прямозубое цилиндрические;
- Косозубое цилиндрическое;
- Шевронное;

Косозубые и шевронные шестерни обеспечивают наиболее плавный поток, чем прямозубые. В агрегатах, рассчитанных на более высокую производительность, чаще используют косозубые и шевронные колеса.

Шестеренчатые насосы с небольшой производительностью чаще всего работают на скорости 1750 или 3450 об/мин. У насосов с большим типоразмером шестерни вращаются со скоростью порядка 650 об/мин.

Внутренняя полость насоса изготавливается с малыми зазорами относительно зубчатых колес. Такие насосы широко применяются в различных гидравлических системах, так как способны создавать высокое давление до 200 бар. Таких показателей добиваются благодаря тому, что вал насоса поддерживается с обеих сторон.

Ведущая шестерня насоса получает вращательное движение от привода насоса, после чего передает это движение ведомой, соответственно шестерни вращаются в противоположные стороны.

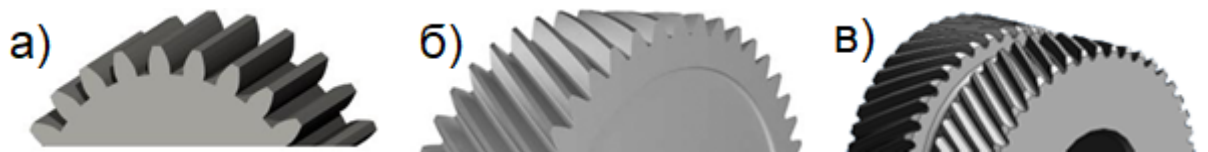


Рисунок 2.1 - Типы зубчатых колес
 а) Прямозубое цилиндрическое б) Косозубое цилиндрическое
 в) Шевронное

Основные этапы работы шестеренчатого насоса внешнего зацепления
 (см. рис. 2.2):

1. Шестерни выходят из зацепления и создают разрежение со стороны входного канала насоса. Материал поступает в образовавшуюся полость и захватывается зубьями шестерен.
2. Вследствие вращения зубчатых колес материал перемещается в объеме между зубьями и стенкой насоса вдоль внутренней его части.
3. Благодаря зацеплению зубьев шестеренчатых колес жидкость под давлением выталкивается через выходной канал насоса.



Рисунок 2.2 - Этапы работы насоса с внешним зацеплением

Преимущества шестеренчатого насоса с внешним зацеплением:

- Высокое давление;
- Широкий выбор материалов;

- Отсутствие перегрузок на валу из-за подшипников с двух сторон;
- Низкий уровень шума при работе;
- Транспортировка высоковязких материалов;
- Возможность использования в дозирочном оборудовании;
- Реверсивность;

Недостатки шестеренчатого насоса с внешним зацеплением:

- Расположение упорных подшипников внутри транспортируемой среды;
- Необходимость фильтрации материала от твердых включений;
- Малая эффективность при работе с материалами низкой вязкости;
- Недопустимость работы «в сухую»;

2.2 Шестеренчатый насос внутреннего зацепления

Отличительной чертой шестеренчатых конструкций внутреннего зацепления является работа с материалами различной вязкости. Такие типы насосов используются при транспортировке как легко текущих материалов, так и тягучих жидкостей. Вязкость материала может варьироваться от 1 до 100000 сПз, температура среды может достигать до 400 градусов, что позволяет использовать насосы при горячем или химическом производстве, что делает устройство универсальным.

Шестеренчатый насос внутреннего зацепления отличается наличием уплотнителя вала, встроенным предохранительным клапаном.

Основные этапы работы шестеренчатого насоса внутреннего зацепления (см. рис. 2.3):

1. Через входной канал происходит подача материала к полости между шестерней и ротором.
2. Перемещение происходит между зубьями шестерней, вставка в виде полукруга обеспечивает защиту от перелива.

3. Проточная часть гидравлического механизма всегда заполнена жидкостью в процессе работы. Вытесняется жидкость путем полностью стыкованных зубьев ротора, которые уплотнены вставками.

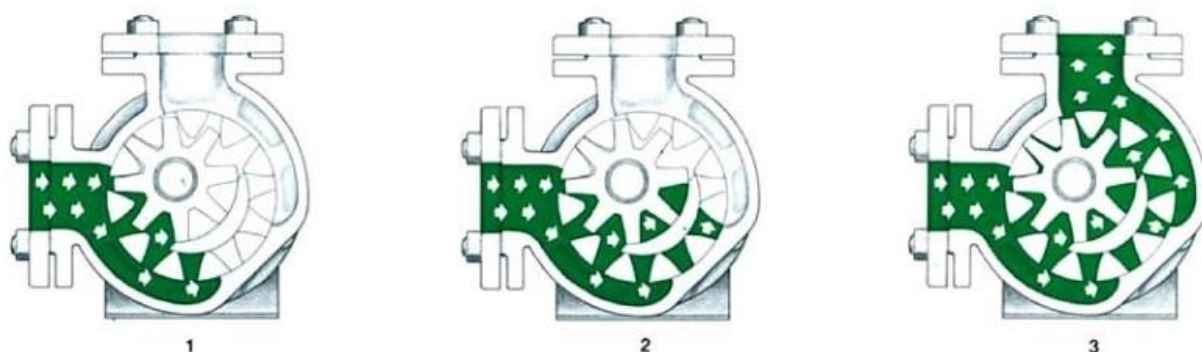


Рисунок 2.3 - Основные этапы работы насоса с внутренним зацеплением

Преимущества шестеренчатого насоса с внутренним зацеплением:

- Простое обслуживание;
- Способность работы с высоковязкими жидкостями;
- Наличие только двух подвижных элемента;
- Присутствие только одного уплотнения вала;
- Работа без пульсаций;
- Настраиваемый зазор между зубьями и корпусом;
- Широкий выбор материалов для работы;
- Реверсивность;

Недостатки шестеренчатого насоса с внутренним зацеплением:

- Необходимость фильтрации материала от твердых включений;
- Присутствие ограничения по давлению
- Постоянное наличие подшипника в перемещаемой среде
- Внешняя радиальная нагрузка на вал

Глава 3. Выбор параметров зубчатых колес для расчета

Перед началом расчета необходимо выбрать основные геометрические параметры зубчатых колес. Основными параметрами в данном случае будут являться: модуль зубчатого колеса, количество зубьев, диаметр по вершине зуба и ширина венца.

Определим ширину венца зубчатого колеса 8мм исходя из геометрии стандартного выходного вала шагового двигателя Nema17, который в дальнейшем будет использован для придания вращения зубчатым колесам, а также толщины стенок корпуса, необходимых для обеспечения жесткости готового прототипа. Зафиксируем диаметр по вершине зуба в пределах 23-24мм исходя из тех же соображений, а также массово-габаритных характеристик готового прототипа.

Для определения модуля зубчатого колеса [3] и количество его зубьев воспользуемся следующей формулой:

$$m = \frac{d_a}{z + 2},$$

где m – модуль зубчатого колеса, d_a – диаметр по вершине зуба, z – количество зубьев.

В таблице 3.1 приведены вычисленные диаметры по вершине зуба, зеленым цветом выделены значения, удовлетворяющие заданным параметрам. Из полученных данных выберем три пары шестеренок:

$$m = 2, z = 10 \text{ – шестеренка №1;}$$

$$m = 1.5, z = 14 \text{ шестеренка №2;}$$

$$m = 1, z = 21 \text{ шестеренка №3,}$$

так как при выборе зубчатых колес с меньшим количеством зубьев будут присутствовать пульсации при подаче материала, которые негативно скажутся на работе конечного прототипа.

Таблица 3.1 - Вычисленные значения диаметра по вершине зуба

$z \backslash m$	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
4	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
5	3,5	7	10,5	14	17,5	21	24,5	28	31,5	35
6	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
7	4,5	9	13,5	18	22,5	27	31,5	36	40,5	45
8	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
9	5,5	11	16,5	22	27,5	33	38,5	44	49,5	55
10	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
11	6,5	13	19,5	26	32,5	39	45,5	52	58,5	65
12	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70
13	7,5	15	22,5	30	37,5	45	52,5	60	67,5	75
14	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80
15	8,5	17	25,5	34	42,5	51	59,5	68	76,5	85
16	9	18	27	36	45	54	63	72	81	90
17	9,5	19	28,5	38	47,5	57	66,5	76	85,5	95
18	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
19	10,5	21	31,5	42	52,5	63	73,5	84	94,5	105
20	11	22	33	44	55	66	77	88	99	110
21	11,5	23	34,5	46	57,5	69	80,5	92	103,5	115
22	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
23	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	100	112,5	125
24	13	26	39	52	65	78	91	104	117	130
25	13,5	27	40,5	54	67,5	81	94,5	108	121,5	135

Для расчета производительности в общем случае можно воспользоваться формулой

$$Q = 2 * \pi * m^2 * z * b * n,$$

где Q – производительности насоса, m – модуль зубчатого колеса, z – количество зубьев зубчатого колеса, b – ширина венца зубчатого колеса, n – частота вращения зубчатого колеса.

Так как часть переменных, а именно b и n будут статичны между расчетами в пределах одного расчетного случая, а $2 * \pi$ является константой, можно сделать вывод, что производительность расчета в таком случае зависит только от m и z , следовательно

$$Q \sim m^2 * z.$$

В таблице 3.2 приведены расчеты зависимости производительности насоса только при учете изменяемых параметров, зеленым цветом выделены

ячейки, пара при расчете которых выполняется условие диаметра по вершине зубьев и таблицы 3.1, толстыми внешними границами выделены значения, выбранные на предыдущем шаге.

Анализируя таблицу 3.2, можно заметить, что при дальнейших расчетах лучшую производительность должна показать шестеренка №1, а худшую шестеренка №3, убедимся в этом проведя расчеты методом конечно-элементного моделирования.

Таблица 3.2 - Расчетные значения производительности относительно изменяемых параметров

$z \backslash m$	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
4	1	4	9	16	25	36	49	64	81	100
5	1,25	5	11,25	20	31,25	45	61,25	80	101,25	125
6	1,5	6	13,5	24	37,5	54	73,5	96	121,5	150
7	1,75	7	15,75	28	43,75	63	85,75	112	141,75	175
8	2	8	18	32	50	72	98	128	162	200
9	2,25	9	20,25	36	56,25	81	110,25	144	182,25	225
10	2,5	10	22,5	40	62,5	90	122,5	160	202,5	250
11	2,75	11	24,75	44	68,75	99	134,75	176	222,75	275
12	3	12	27	48	75	108	147	192	243	300
13	3,25	13	29,25	52	81,25	117	159,25	208	263,25	325
14	3,5	14	31,5	56	87,5	126	171,5	224	283,5	350
15	3,75	15	33,75	60	93,75	135	183,75	240	303,75	375
16	4	16	36	64	100	144	196	256	324	400
17	4,25	17	38,25	68	106,25	153	208,25	272	344,25	425
18	4,5	18	40,5	72	112,5	162	220,5	288	364,5	450
19	4,75	19	42,75	76	118,75	171	232,75	304	384,75	475
20	5	20	45	80	125	180	245	320	405	500
21	5,25	21	47,25	84	131,25	189	257,25	336	425,25	525
22	5,5	22	49,5	88	137,5	198	269,5	352	445,5	550
23	5,75	23	51,75	92	143,75	207	281,75	368	465,75	575
24	6	24	54	96	150	216	294	384	486	600
25	6,25	25	56,25	100	156,25	225	306,25	400	506,25	625

Глава 4. Численный расчет производительности экструдера

Численный расчет производительности экструдера будет осуществляться при помощи программы Ansys CFX 2022 R1 [14], создание сетки зубчатых колес и внутренней полости экструдера проводится при использовании программы ICEM CFD 2022 R1 [15]. При выполнении расчетов в рамках исследования используются сетки на основе тетраэдров. Вблизи стенок корпуса экструдера используются слои призматических элементов, позволяющих качественно моделировать поведение вязкой жидкости в области пограничного слоя [5].

На рисунке 4.1 представлены шестеренки, выбранные для расчета, в таблице 4.1 указаны их характеристики.

Таблица 4.1 - Геометрические характеристики исследуемых шестеренок

	m	z	d_a , мм
Шестеренка №1	2	10	24
Шестеренка №2	1,5	14	24
Шестеренка №3	1	21	23

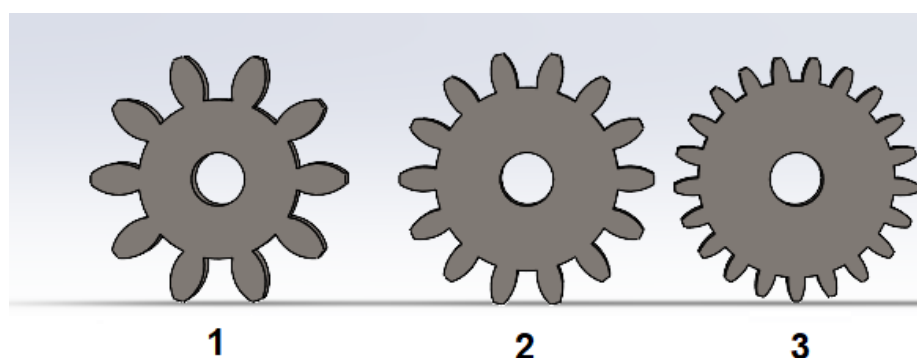


Рисунок 4.1 - Исследуемые шестеренки

4.1 Расчет шестеренки №1

Исходные параметры шестеренок, применяемые для расчета:

$$m = 2;$$

$$z = 10;$$

$$d_a = 24\text{мм};$$

$$\omega = 2 \frac{\text{об}}{\text{сек}};$$

Исходные параметры материала, применяемые для расчета:

$$\rho = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$M = 500 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}};$$

Для проведения оценки производительности экструдера необходимо построить конечно-элементную сетку исследуемой шестеренки (см. рис. 4.2), а также внутренней полости экструдера (см. рис. 4.3 – рис. 4.4)

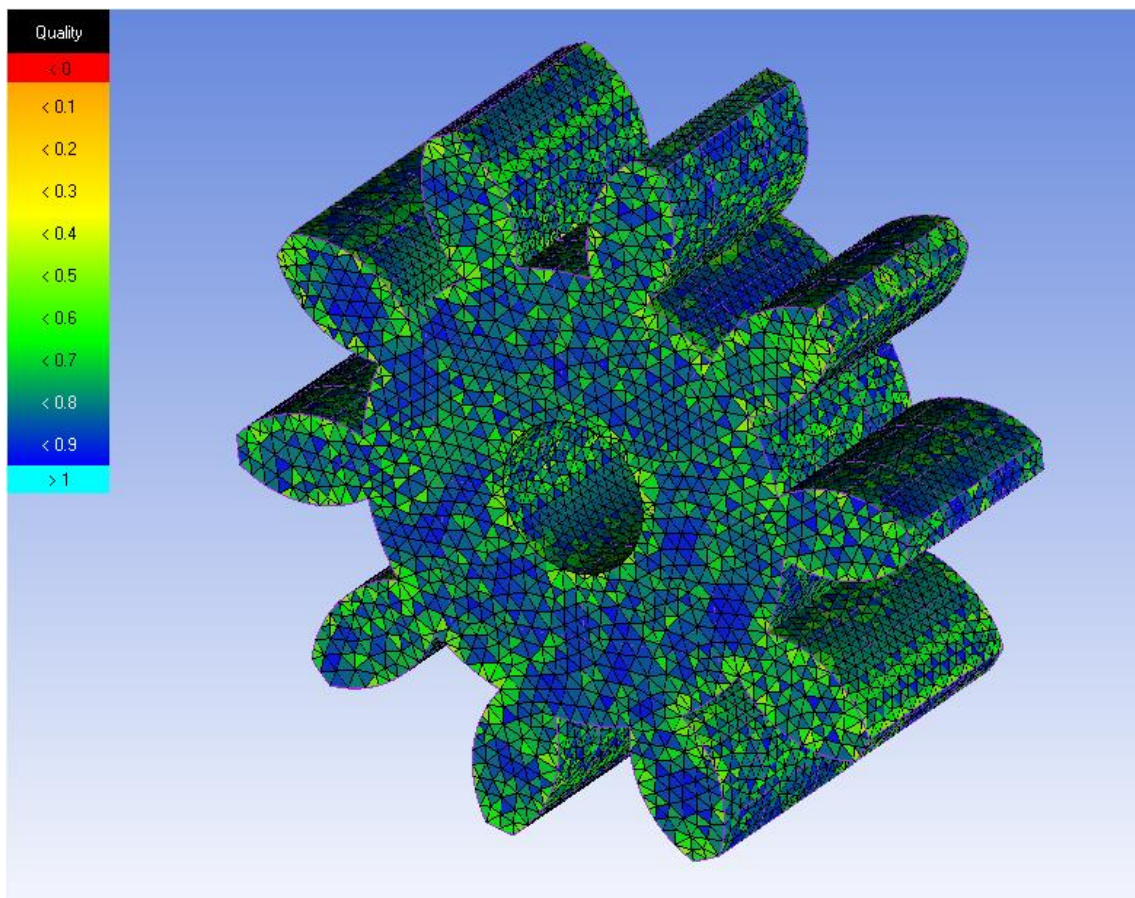


Рисунок 4.2 - КЭ сетка шестеренки, 263438 элементов

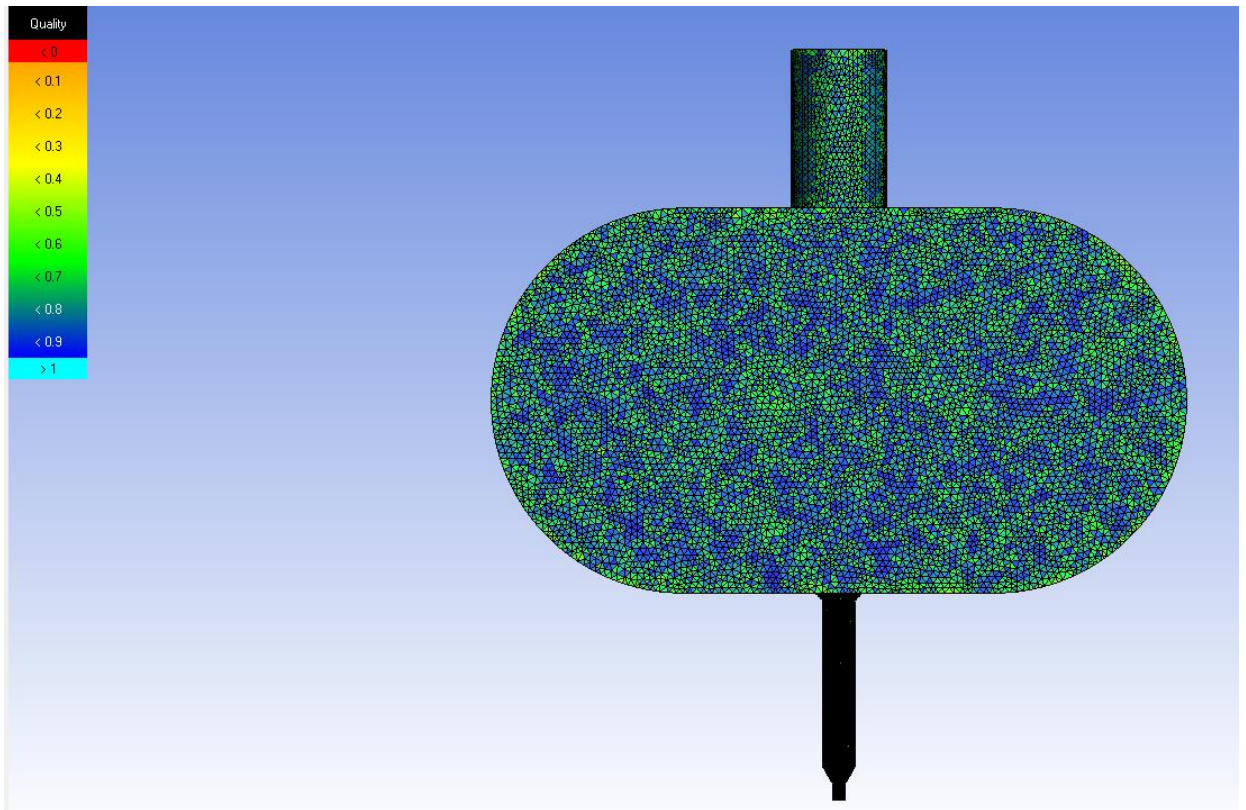


Рисунок 4.3 - КЭ сетка внутренней полости экструдера (общий вид),
1842767 элементов

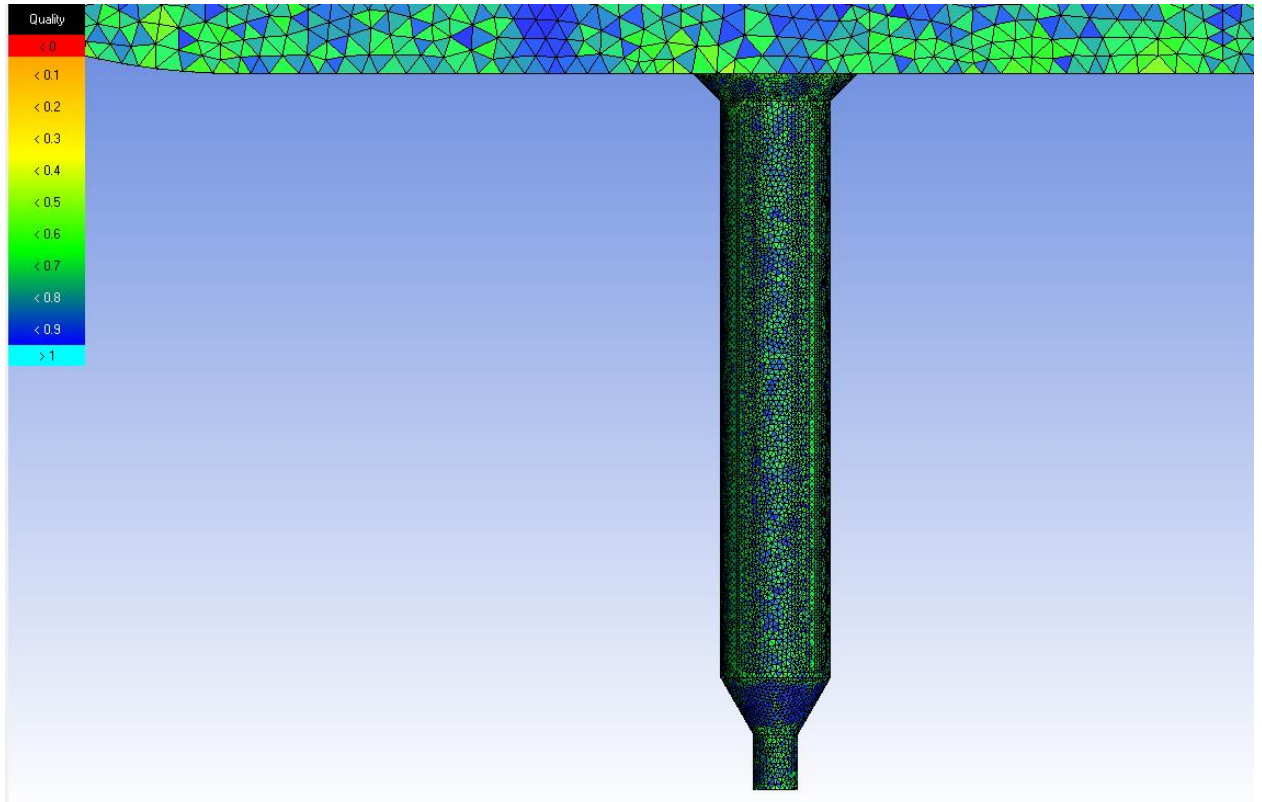


Рисунок 4.4 - КЭ сетка внутренней полости экструдера (выходная часть)

На рис.4.5 – 4.6 приведены статистики качества конечных элементов (Mesh Quality). Для проведения конечно-элементного расчета достаточным условием является превышение параметра качества сетки в 0.2 для всех конечных элементов модели (в случае КЭ-сетки, построенной на основе тетраэдров). Как видно из рисунков, построенная КЭ-сетка удовлетворяет данному требованию.

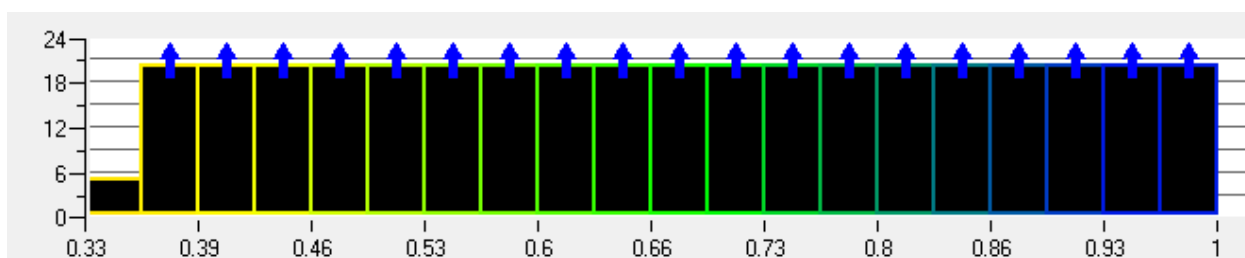


Рисунок 4.5 - Качество КЭ шестеренки (Mesh Quality)

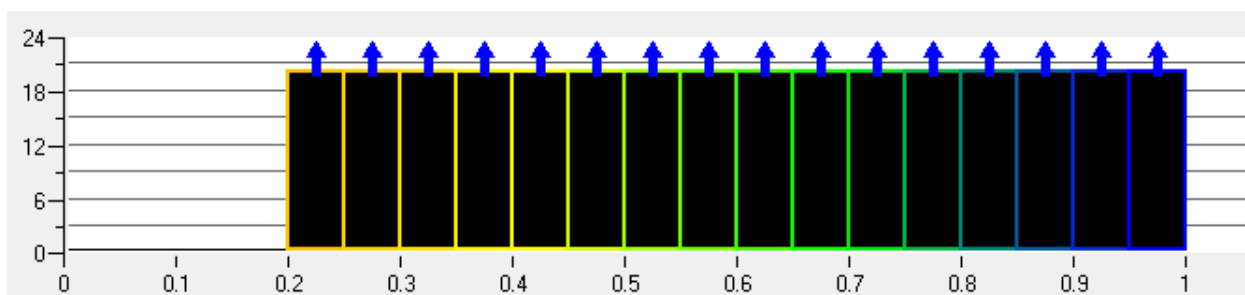


Рисунок 4.6 - Качество КЭ внутренней полости экструдера (Mesh Quality)

Граничные условия (см. рис. 4.7):

1. На верхнем торце корпуса экструдера (Inlet в Fluid Domain) ставится давление Total Pressure, равное давлению столба литейного воска высотой 5 см (440 Па).
2. На выходе из сопла (Outlet в Fluid Domain) ставится условие свободного выхода Opening с опцией Opening Pressure = 0 Па.
3. На стенках корпуса экструдера (Fluid Domain) ставится условие стенки Wall.

На рис. 4.8 – 4.9 показаны полученные результаты скорости и давления XY с наложенными векторами скорости.

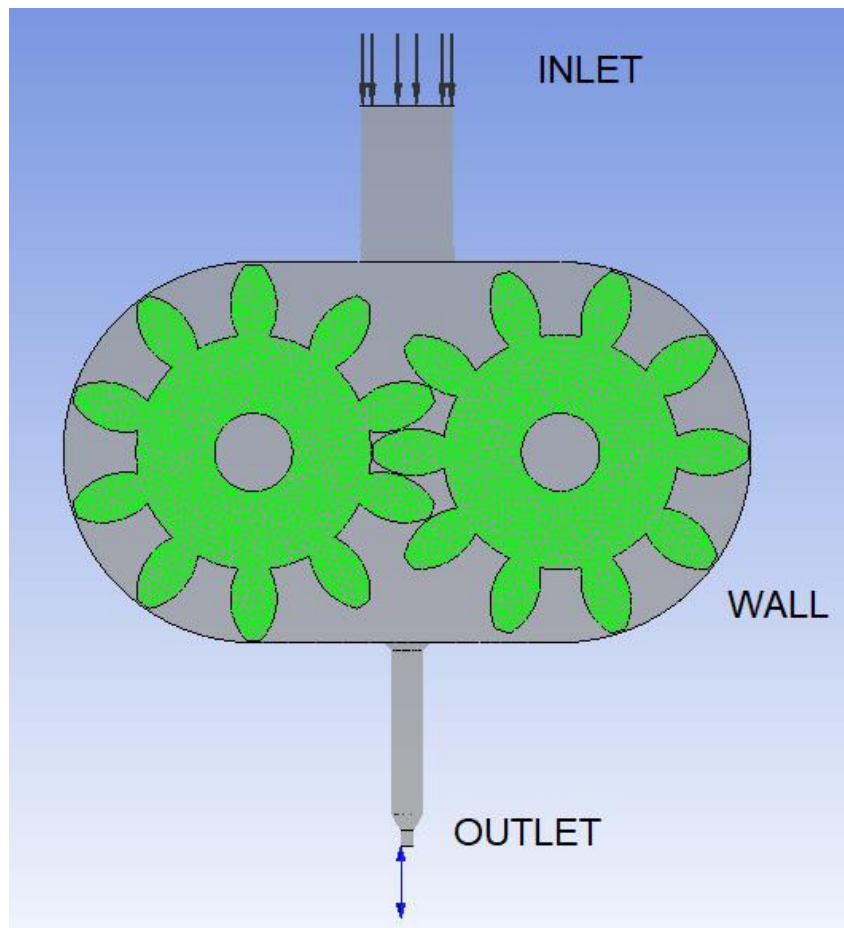


Рисунок 4.7 - Граничные условия

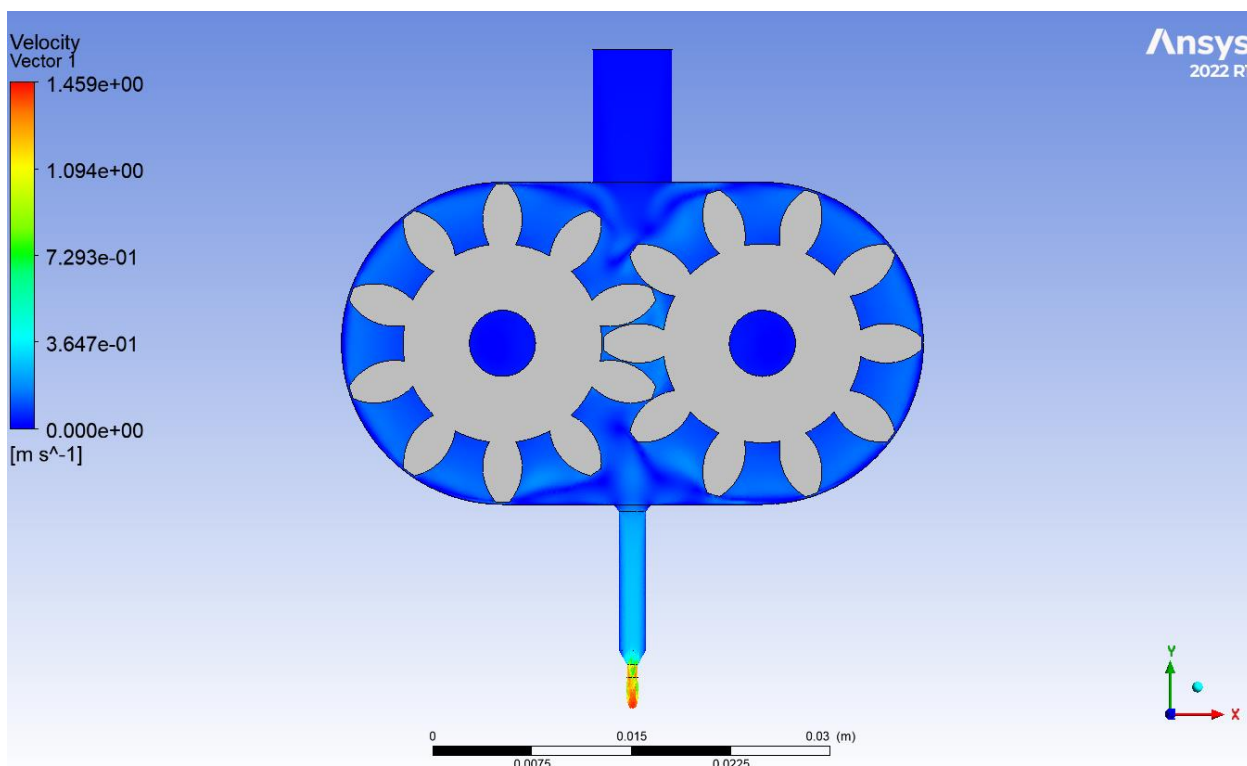


Рисунок 4.8 - Распределение скорости в сечении XY

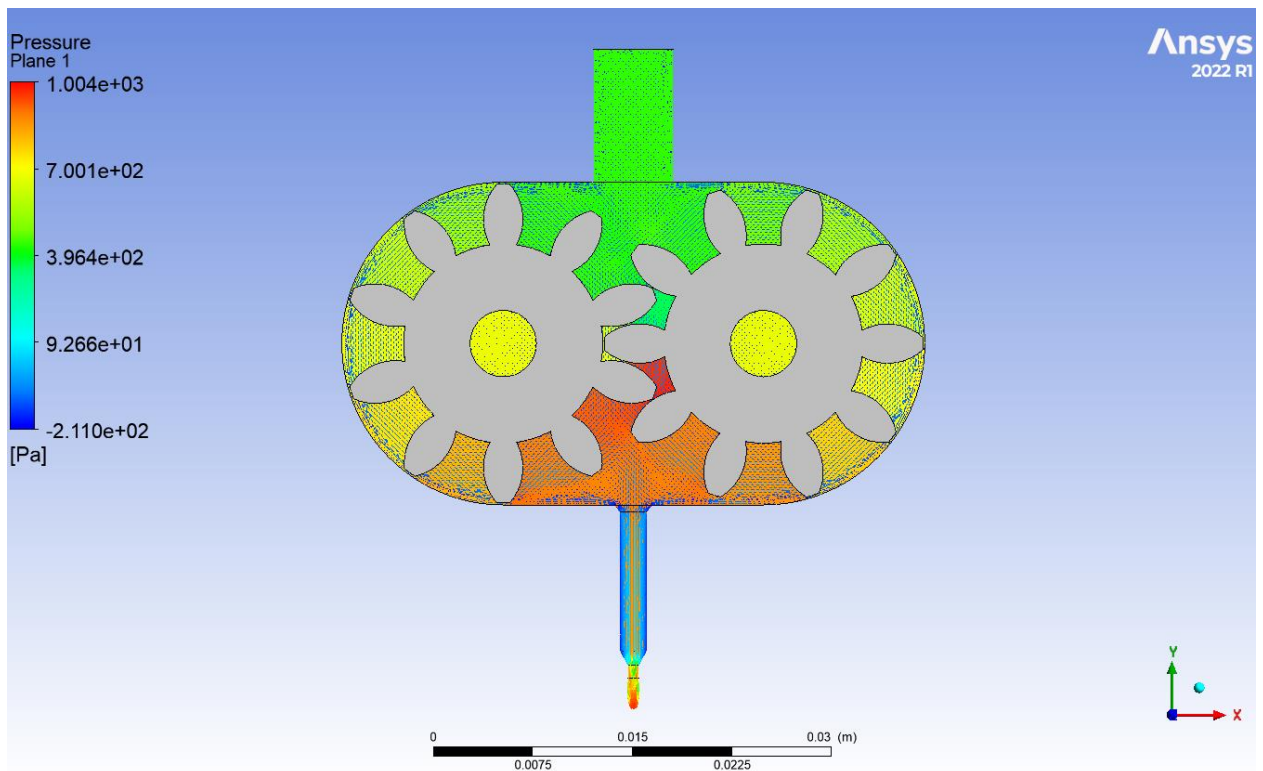


Рисунок 4.9 - Распределение давления в сечении XY

Наиболее информативные значения находятся в плоскости OUTLET, которая является плоскостью выходного отверстия, на рис. 4.10 показаны значения средней скорости в плоскости выходного отверстия, а также массового расхода, рассчитанные встроенными средствами ANSYS CFX.

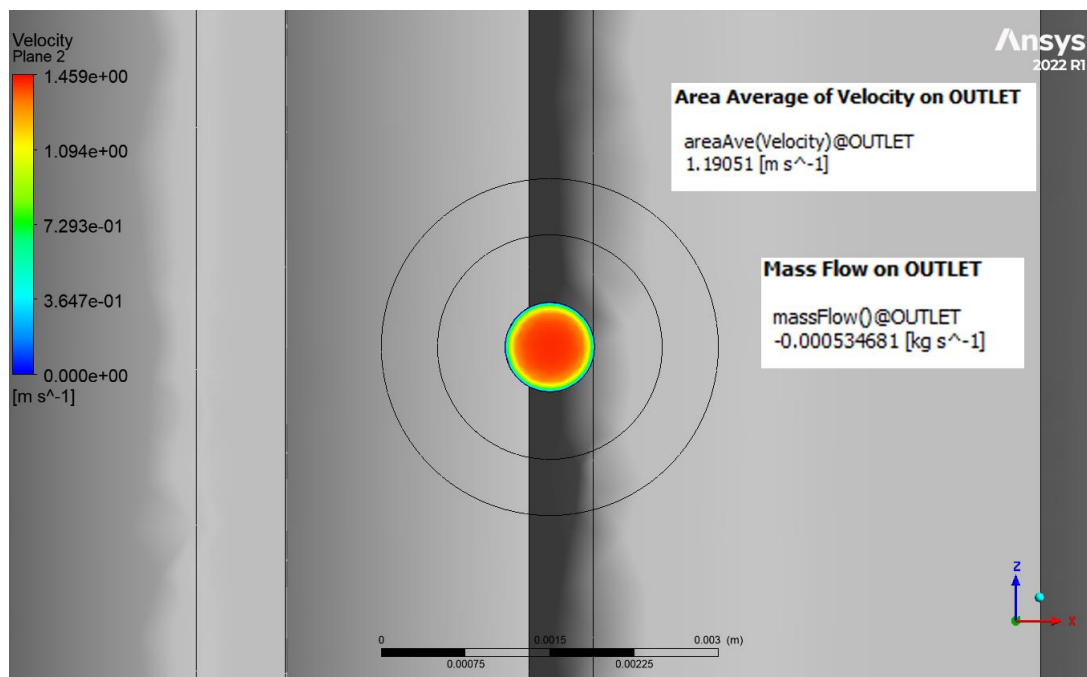


Рисунок 4.10 - Полученные результаты в плоскости OUTLET

4.2 Расчет шестеренки №2

Исходные параметры шестеренок, применяемые для расчета:

$$m = 1,5;$$

$$z = 14;$$

$$d_a = 24\text{мм};$$

$$\omega = 2 \frac{\text{об}}{\text{сек}};$$

Исходные параметры материала, применяемые для расчета:

$$\rho = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$M = 500 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}};$$

Для проведения оценки производительности экструдера необходимо построить конечно-элементную сетку исследуемой шестеренки (см. рис. 4.11), а также внутренней полости экструдера (см. рис. 4.12 – рис. 4.13)

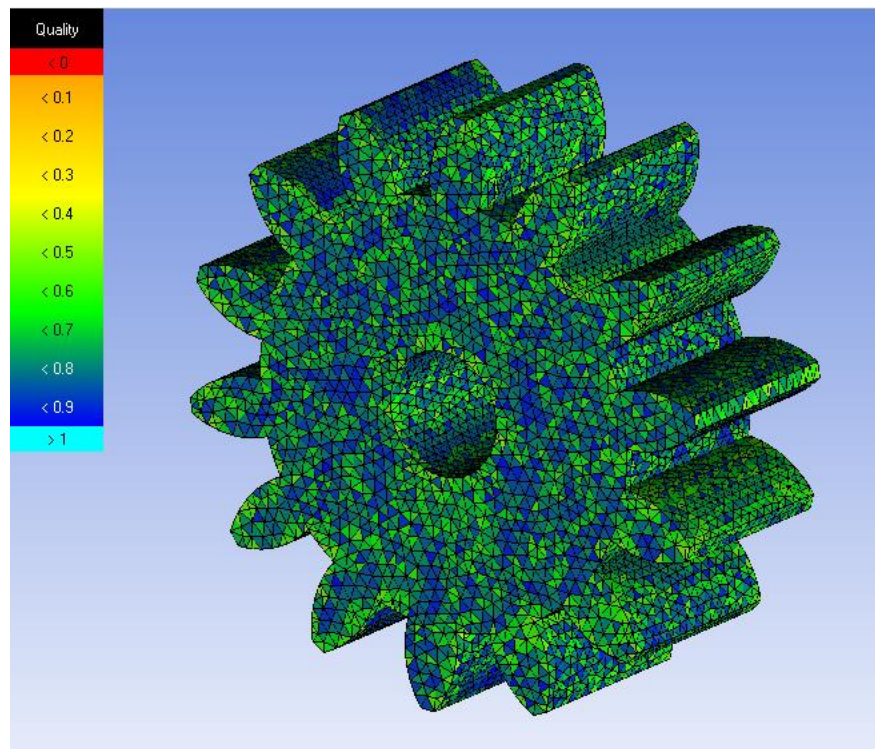


Рисунок 4.11 - КЭ сетка шестеренки, 297200 элементов

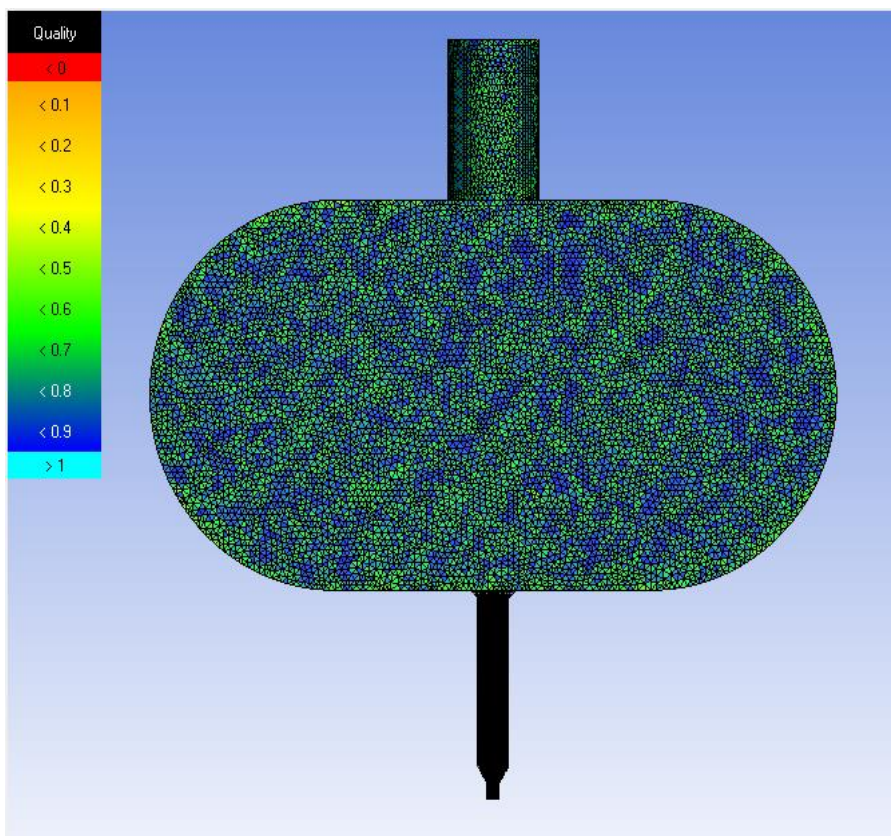


Рисунок 4.12 - КЭ сетка внутренней полости экструдера (общий вид),
1892531 элементов

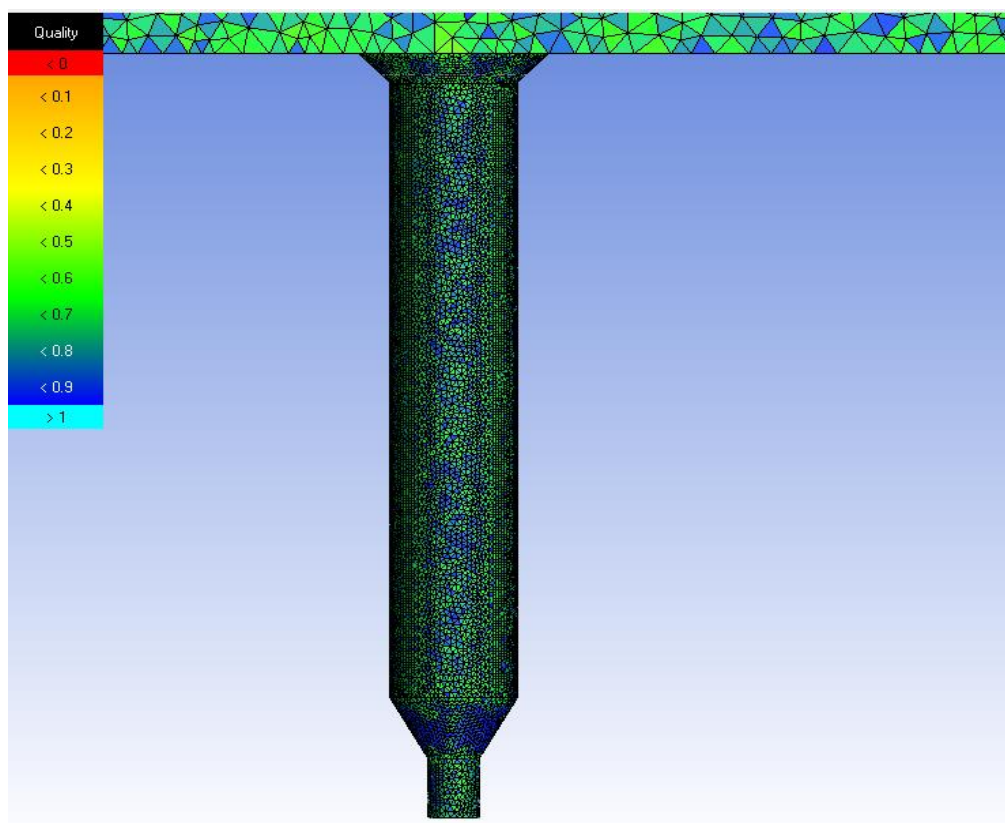


Рисунок 4.13 - КЭ сетка внутренней полости экструдера (выходная часть)

На рис. 4.14 – 4.15 приведены статистики качества конечных элементов (Mesh Quality). Для проведения конечно-элементного расчета достаточным условием является превышение параметра качества сетки в 0.2 для всех конечных элементов модели (в случае КЭ-сетки, построенной на основе тетраэдров). Как видно из рисунков, построенная КЭ-сетка удовлетворяет данному требованию.

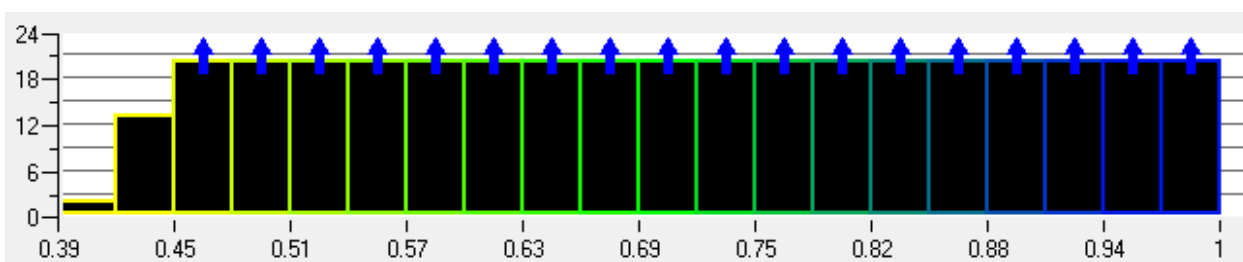


Рисунок 4.14 - Качество КЭ шестеренки (Mesh Quality)

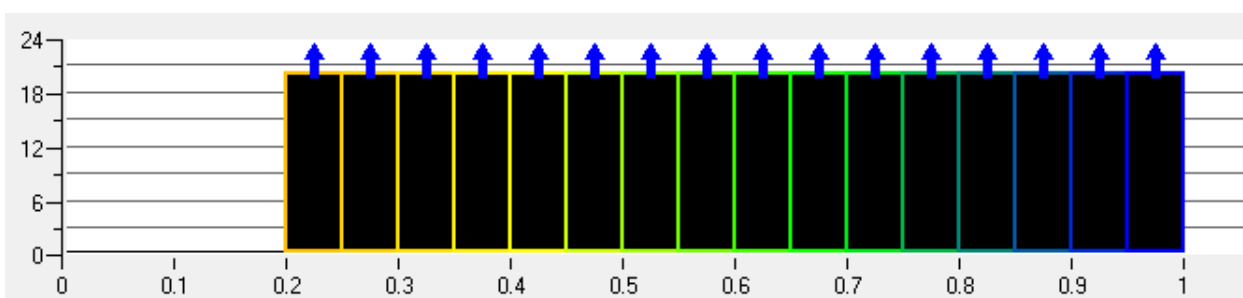


Рисунок 4.15 - Качество КЭ внутренней полости экструдера (Mesh Quality)

Граничные условия (см. рис. 4.16):

4. На верхнем торце корпуса экструдера (Inlet в Fluid Domain) ставится давление Total Pressure, равное давлению столба литейного воска высотой 5 см (440 Па).
5. На выходе из сопла (Outlet в Fluid Domain) ставится условие свободного выхода Opening с опцией Opening Pressure = 0 Па.
6. На стенках корпуса экструдера (Fluid Domain) ставится условие стенки Wall.

На рис. 4.17 – 4.18 показаны полученные результаты скорости и давления XY с наложенными векторами скорости.

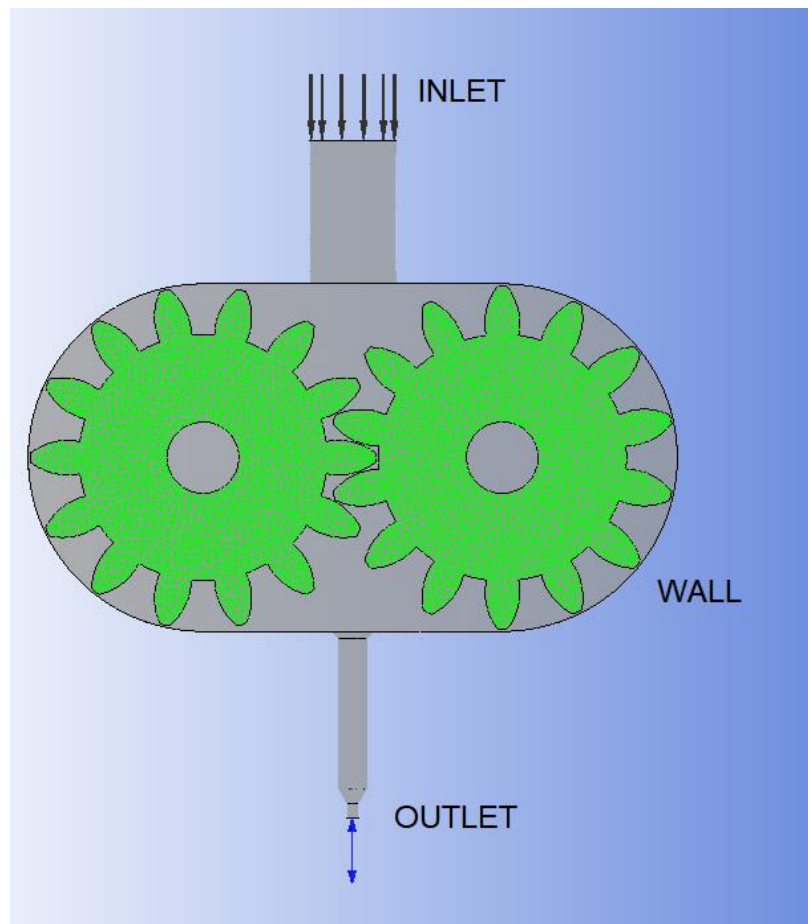


Рисунок 4.16 - Граничные условия

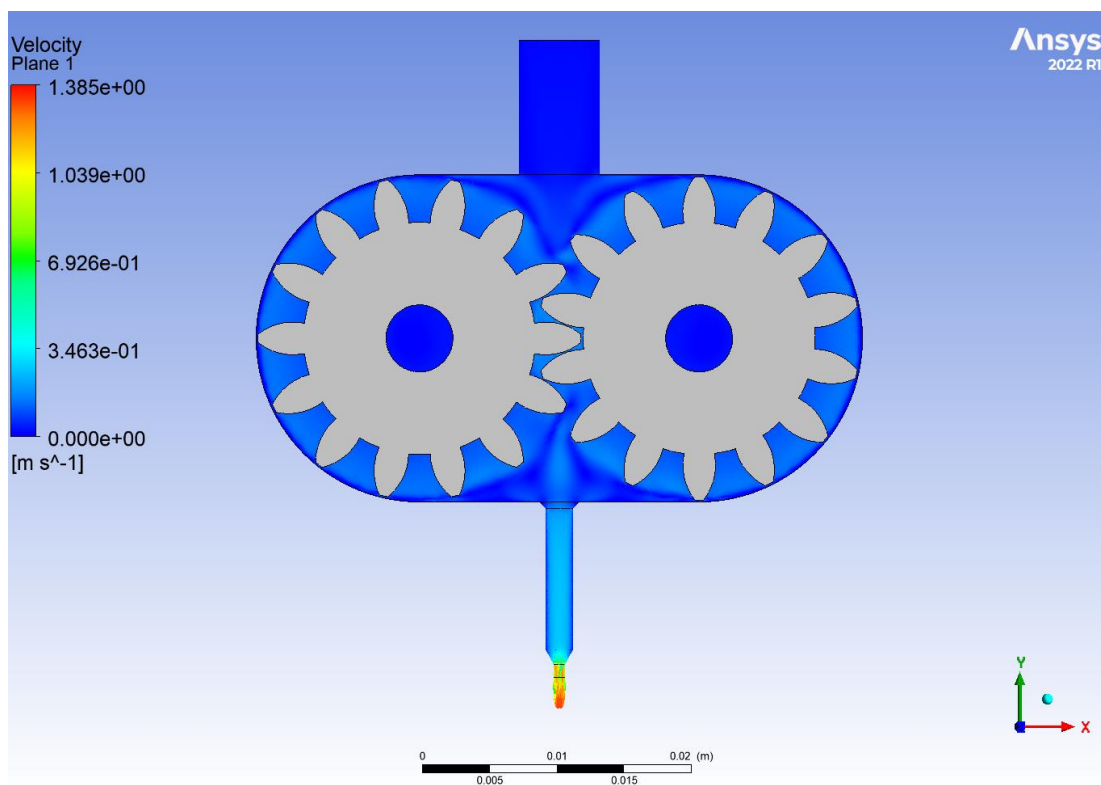


Рисунок 4.17 - Распределение скорости в сечении XY

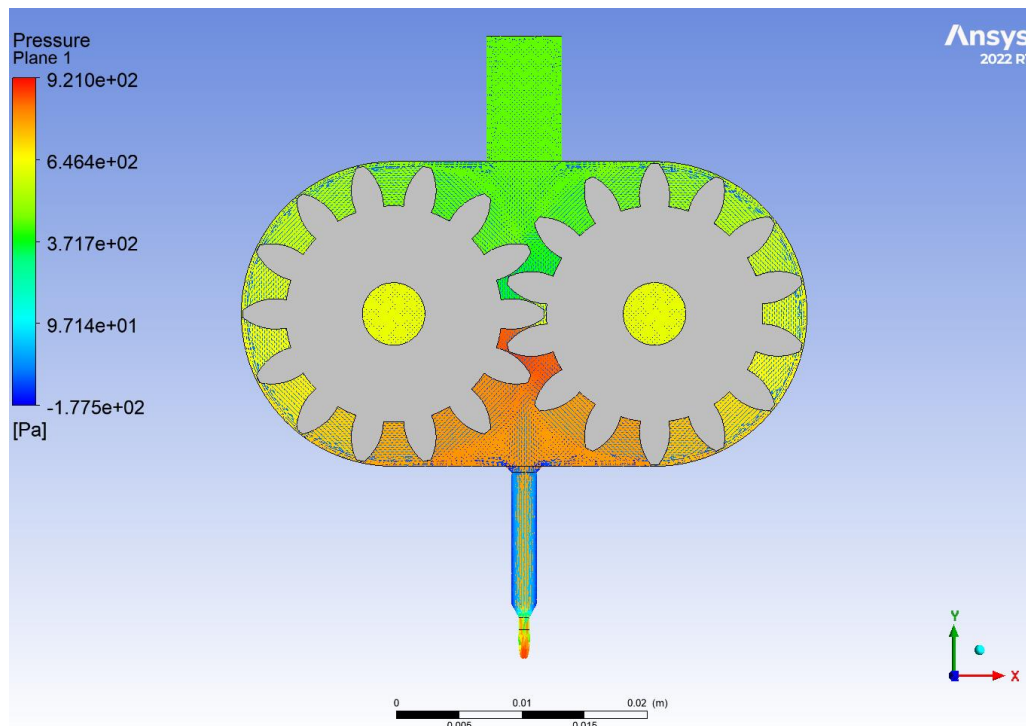


Рисунок 4.18 - Распределение давления в сечении XY

Наиболее информативные значения находятся в плоскости OUTLET, которая является плоскостью выходного отверстия, на рис. 4.19 показаны значения средней скорости в плоскости выходного отверстия, а также массового расхода, рассчитанные встроенными средствами ANSYS CFX.

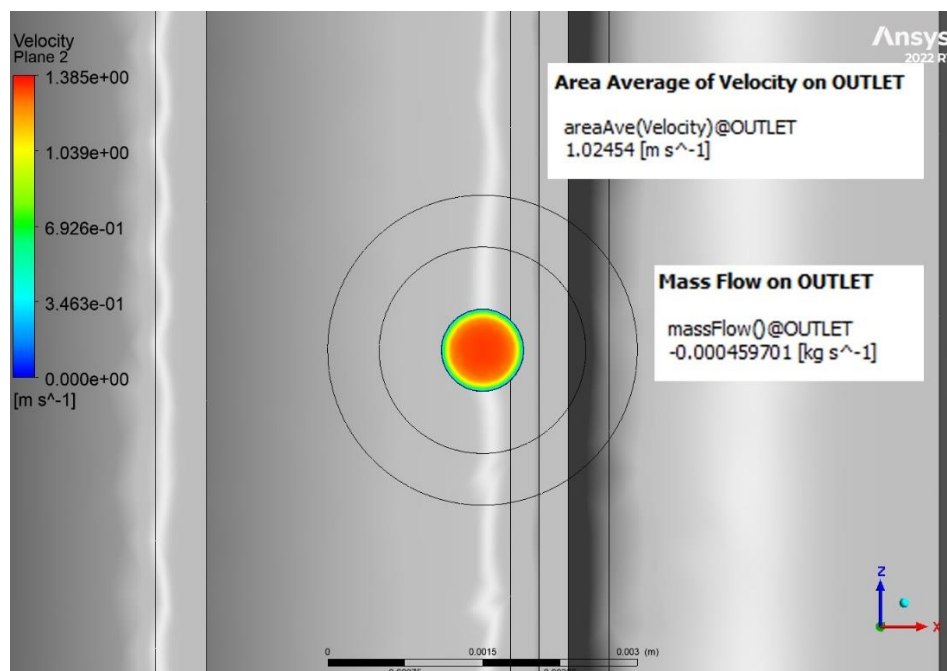


Рисунок 4.19 - Полученные результаты в плоскости OUTLET

4.3 Расчет шестеренки №3

Исходные параметры шестеренок, применяемые для расчета:

$$m = 1;$$

$$z = 21;$$

$$d_a = 23\text{мм};$$

$$\omega = 2 \frac{\text{об}}{\text{сек}};$$

Исходные параметры материала, применяемые для расчета:

$$\rho = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$M = 500 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}};$$

Для проведения оценки производительности экструдера необходимо построить конечно-элементную сетку исследуемой шестеренки (см. рис. 4.20), а также внутренней полости экструдера (см. рис. 4.21 – рис. 4.22)

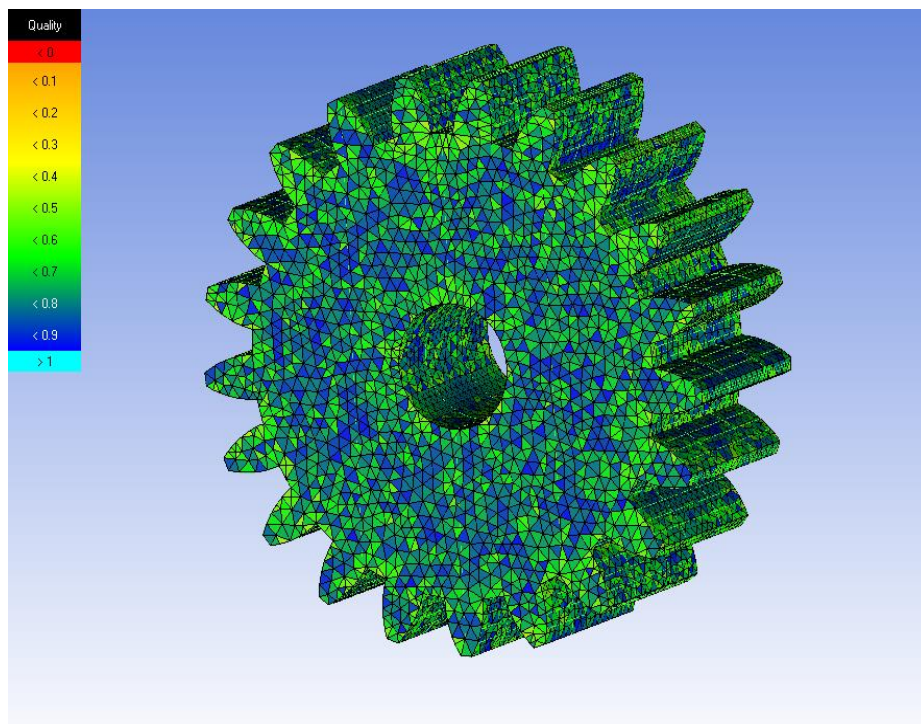


Рисунок 4.20 - КЭ сетка шестеренки, 305048 элементов

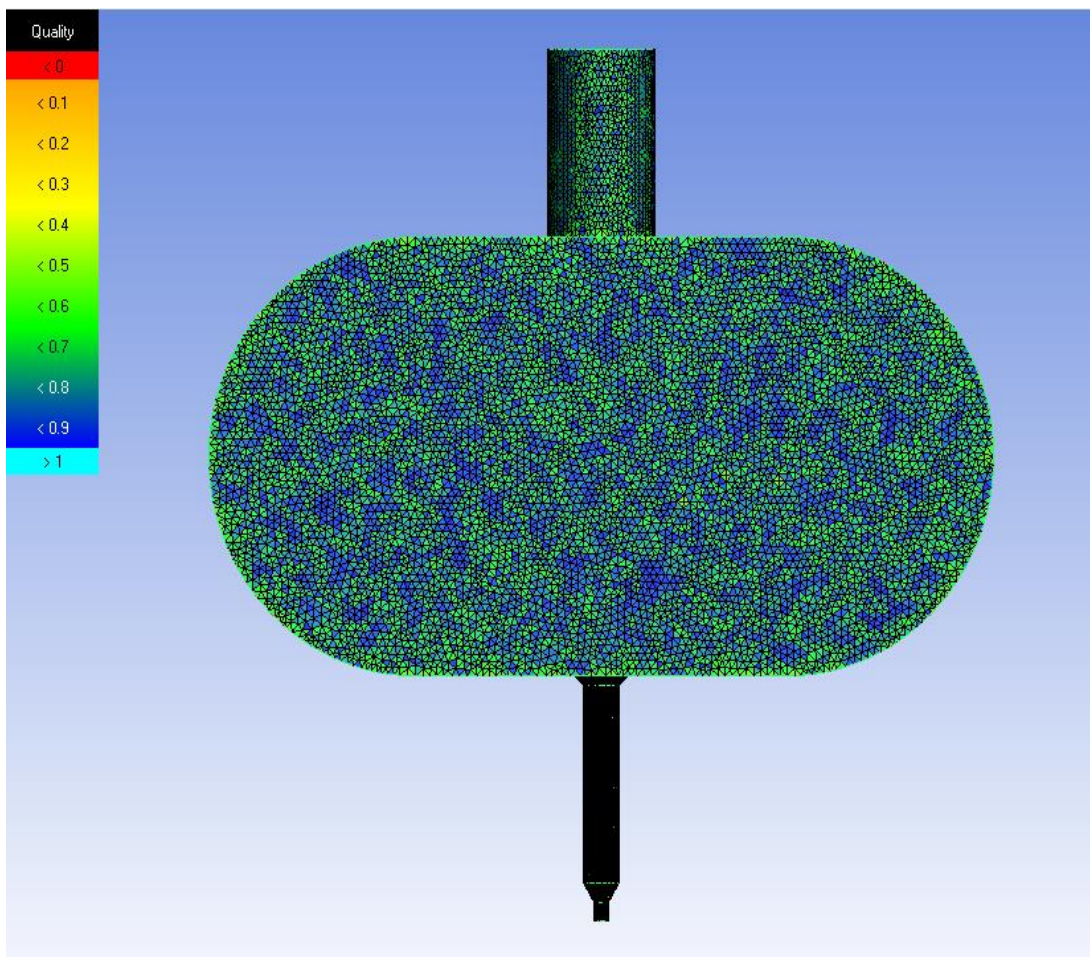


Рисунок 4.21 - КЭ сетка внутренней полости экструдера (общий вид),
1789953 элементов

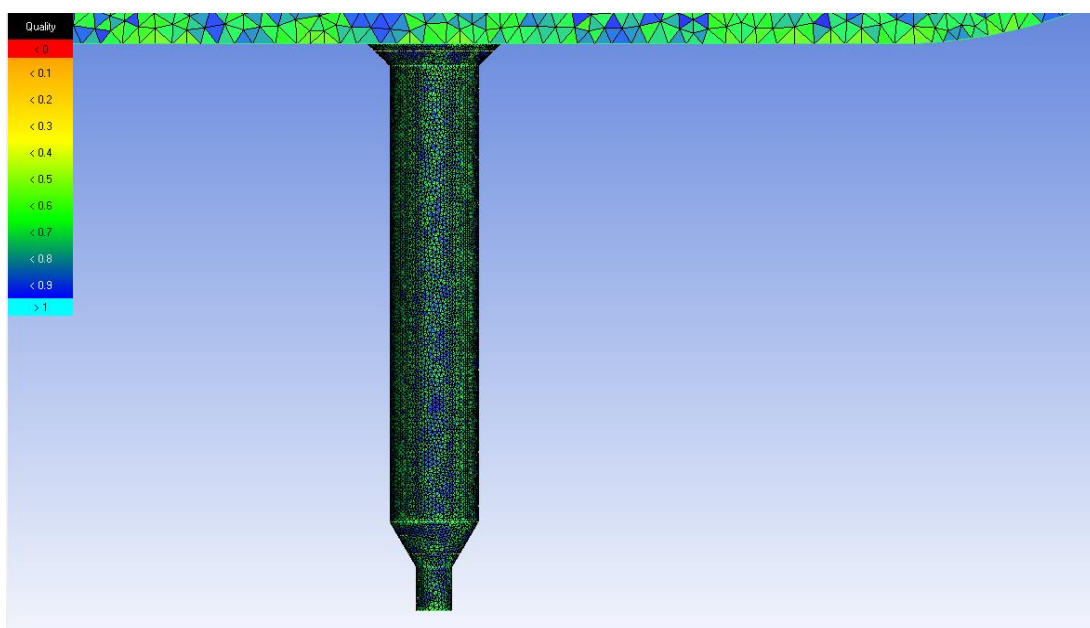


Рисунок 4.22 - КЭ сетка внутренней полости экструдера (выходная часть)

На рис. 4.23 – 4.24 приведены статистики качества конечных элементов (Mesh Quality). Для проведения конечно-элементного расчета достаточным условием является превышение параметра качества сетки в 0.2 для всех конечных элементов модели (в случае КЭ-сетки, построенной на основе тетраэдров). Как видно из рисунков, построенная КЭ-сетка удовлетворяет данному требованию.

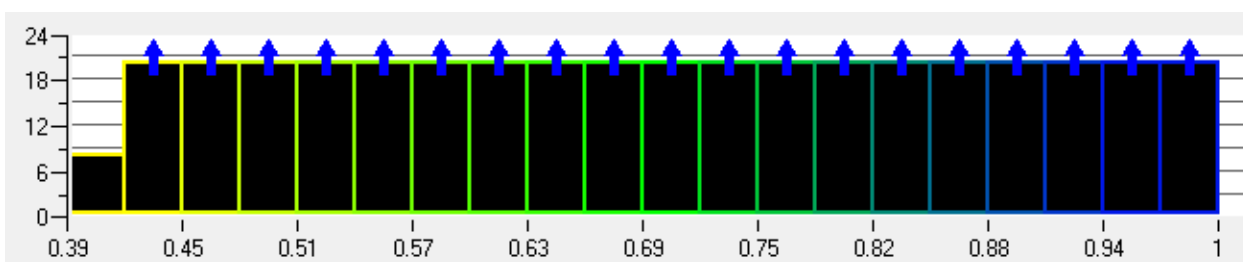


Рисунок 4.23 - Качество КЭ шестеренки (Mesh Quality)

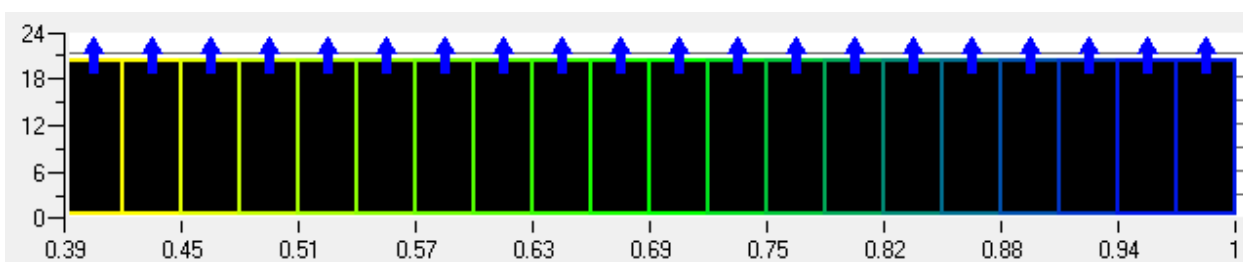


Рисунок 4.24 - Качество КЭ внутренней полости экструдера (Mesh Quality)

Граничные условия (см. рис. 4.25):

7. На верхнем торце корпуса экструдера (Inlet в Fluid Domain) ставится давление Total Pressure, равное давлению столба литейного воска высотой 5 см (440 Па).
8. На выходе из сопла (Outlet в Fluid Domain) ставится условие свободного выхода Opening с опцией Opening Pressure = 0 Па.
9. На стенках корпуса экструдера (Fluid Domain) ставится условие стенки Wall.

На рис. 4.26 – 4.27 показаны полученные результаты скорости и давления XY с наложенными векторами скорости.

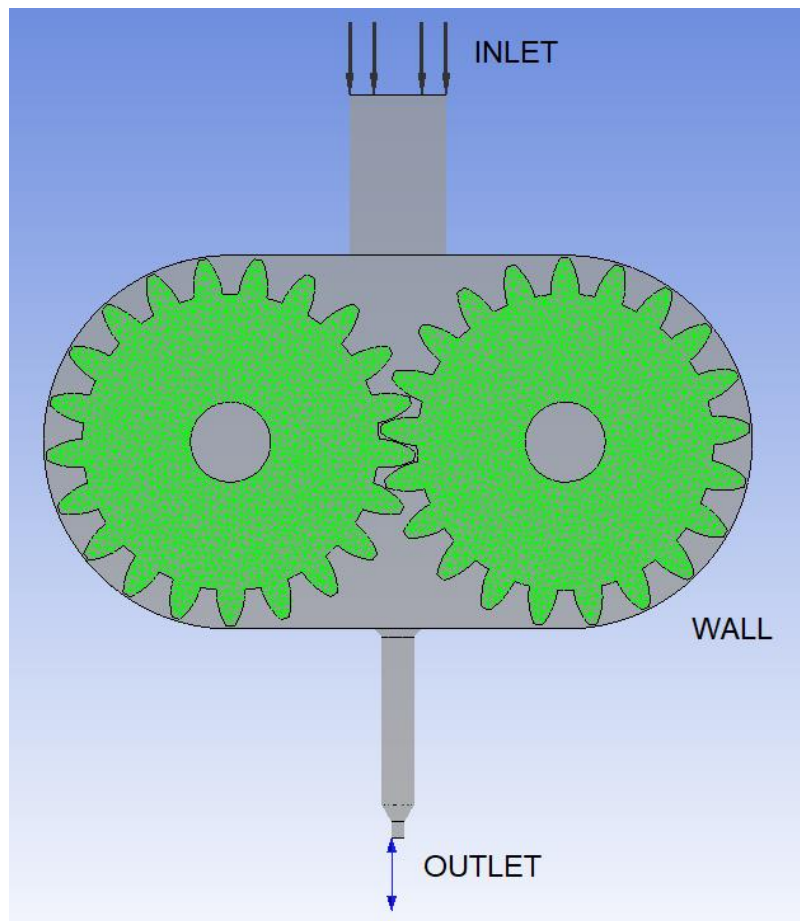


Рисунок 4.25 - Граничные условия

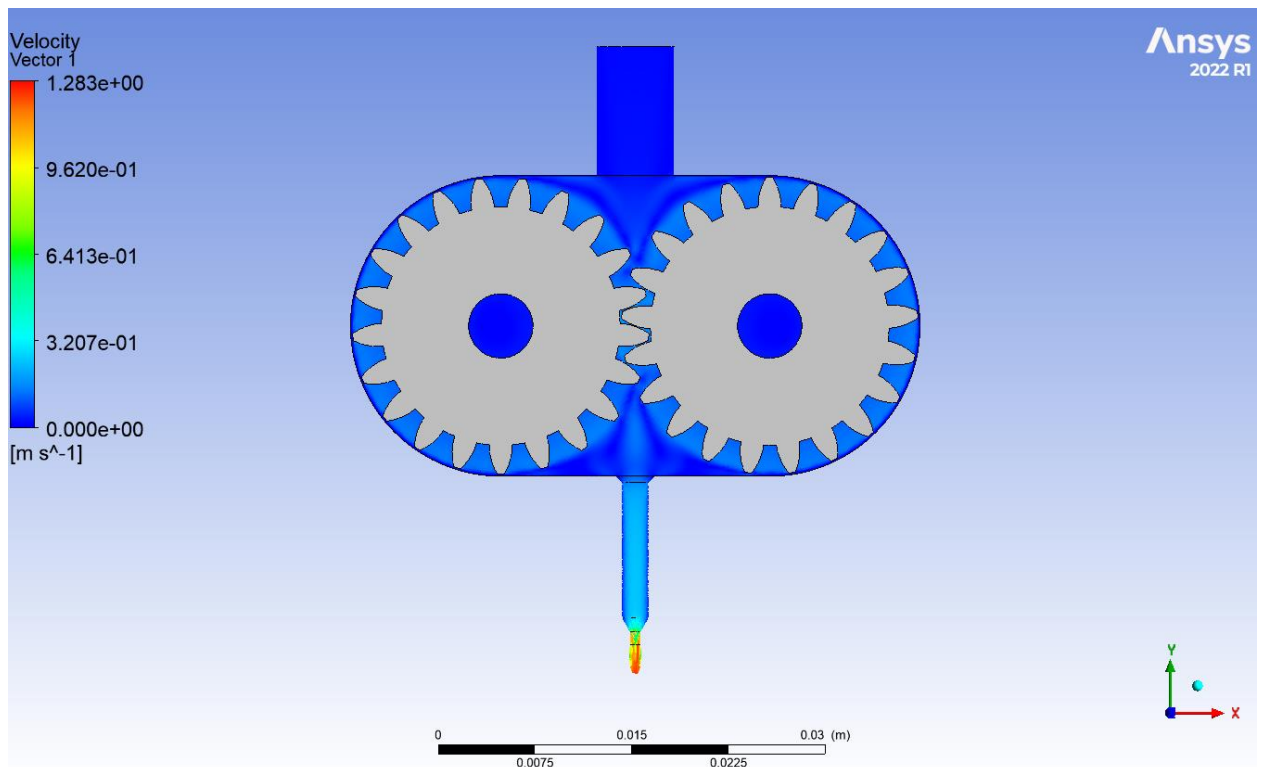


Рисунок 4.26 - Распределение скорости в сечении XY

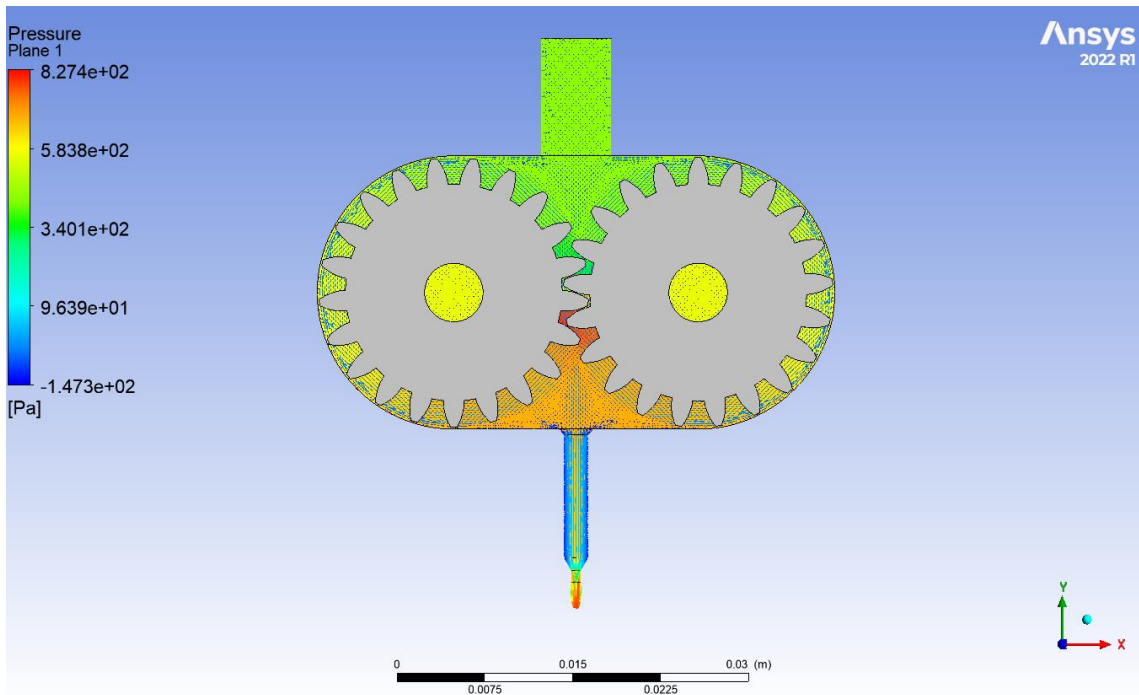


Рисунок 4.27 - Распределение давления в сечении XY

Наиболее информативные значения находятся в плоскости OUTLET, которая является плоскостью выходного отверстия, на рис. 4.28 показаны значения средней скорости в плоскости выходного отверстия, а также массового расхода, рассчитанные встроенными средствами ANSYS CFX.

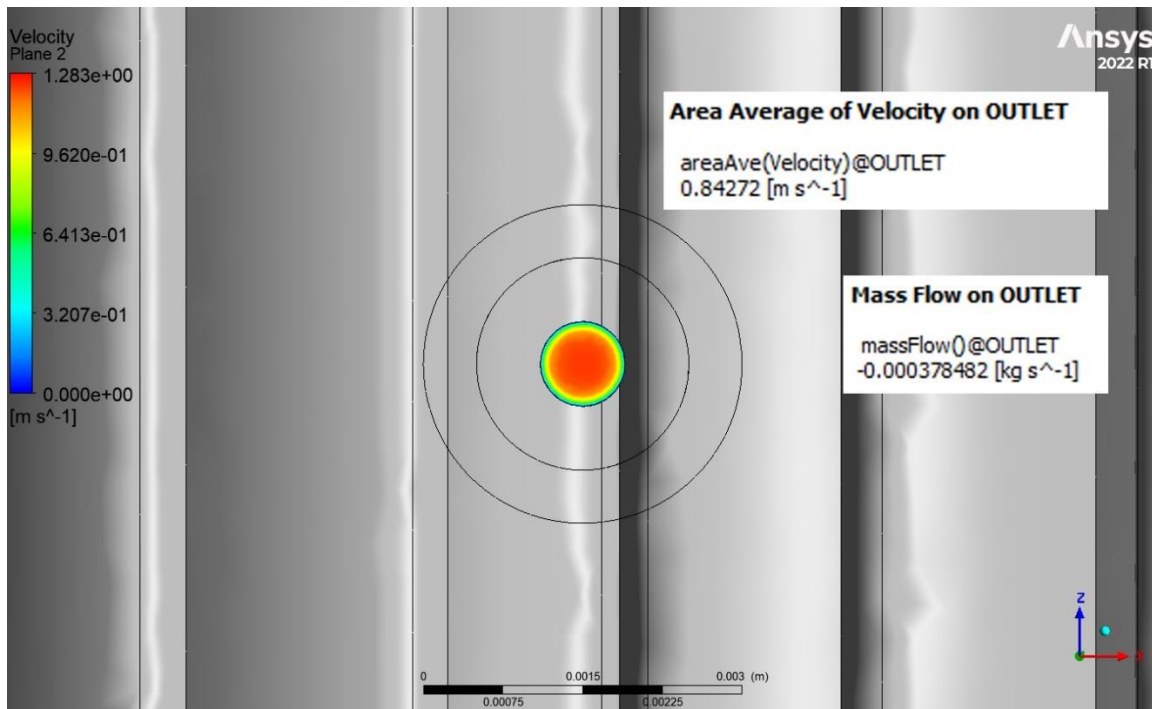


Рисунок 4.28 - Полученные результаты в плоскости OUTLET

Глава 5. Анализ полученных результатов

Проанализируем данные, полученные в предыдущем разделе, для этого составим сравнительную таблицу 5.1

Аналитически вычислим значение массового расхода Q_m , используя значения средней скорости потока в плоскости выходного отверстия, полученные численным методом, для каждой из пар шестеренок по следующей формуле:

$$Q_m^{\text{ан}} = \rho * V * S_c = \rho * V * \pi * r^2 \text{ (кг/с)},$$

где ρ – плотность материала, V – средняя скорость потока через отверстие, S_c – площадь сечения отверстия.

$$Q_{m1}^{\text{ан}} = \rho * V * \pi * r^2 = 900 * 1,190 * 3,14 * 0,0004^2 = 0,000538 \text{ (кг/с)}$$

$$Q_{m2}^{\text{ан}} = \rho * V * \pi * r^2 = 900 * 1,025 * 3,14 * 0,0004^2 = 0,000463 \text{ (кг/с)}$$

$$Q_{m3}^{\text{ан}} = \rho * V * \pi * r^2 = 900 * 0,842 * 3,14 * 0,0004^2 = 0,000380 \text{ (кг/с)}$$

Примем значение массового расхода при использовании шестеренки №1 за 100% и вычислим процентное соотношение для оставшихся зубчатых колес.

Для построения графика (см. рис. 5.1) также сделаем ту же операцию для значений выбранных шестеренок из таблицы 3.2, чтобы привести исследуемые значения к единому интервалу.

Таблица 5.1 - Сравнительная таблица полученных результатов

	Шестеренка №1	Шестеренка №2	Шестеренка №3
$V, \text{ м/с}$	1,190	1,025	0,842
$Q_m^{\text{числ}}, \text{ Г/с}$	0,535	0,460	0,378
$Q_m^{\text{ан}}, \text{ Г/с}$	0,538	0,463	0,380
$Q_m^{\%}, \%$	100	85,98	70,65

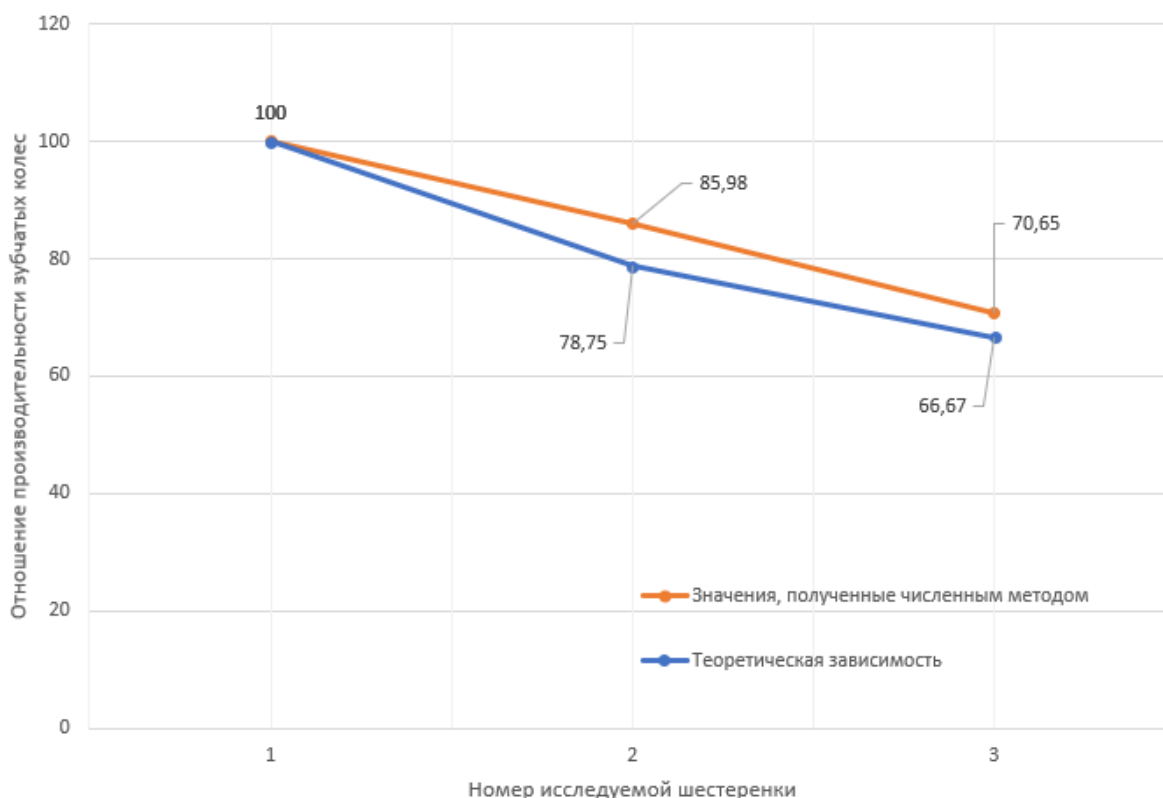


Рисунок 5.1 - График относительной производительности исследуемых зубчатых колес

Значения массового расхода Q_m можно считать критерием производительности, так как такие входные параметры, как частота вращения ведущей шестеренки и выходные, как площадь сечения выходного отверстия, остаются константными с изменением шестеренок.

Анализируя график, представленный на рис. 5.1, можно заметить, что зависимость производительности, рассчитанная численным методом подобна зависимости, рассчитанной аналитически и приведенной в таблице 3.2, но имеются отклонения от референсных значений аналитического расчета зависимости. Данное отклонение на графике можно объяснить тем, что при расчете аналитической зависимости использовалась общая формула для расчета шестеренчатых насосов, в которой предполагается, что входной и выходной каналы одинаковы и не изменяют своих геометрических размеров, как в случае с рассчитываемым прототипом.

Гипотеза, выраженная в пункте 3 о том, что шестеренка №1 будет самой производительной, а шестеренка №3 будет самой менее производительной, подтверждается, поэтому для разработки модели прототипа за основу берутся геометрические характеристики шестеренки №1.

Глава 6. Проектирование шестеренчатого экструдера

В предыдущем пункте было выяснено, что наибольшей производительностью будет обладать экструдер с геометрическими параметрами шестеренки №1, поэтому для проектирования корпуса экструдера были взяты значения $d_a = 24\text{мм}$, $d_r = 15\text{мм}$.

Основная геометрия экструдера была выбрана таким образом, чтобы обеспечивать полное прогревание корпуса и бака при использовании стандартных нагревательных средств, а также с учетом сложности технологических операций [2], выполняющихся в процессе производства.

На рис. 6.1 изображена модель корпуса экструдера, спроектированная с учетом геометрических характеристик выбранных шестеренок. Ведущая шестеренка ставится на вал шагового двигателя, проходящий через сквозное отверстие. Глухое отверстие предназначено для вала ведомой шестерни, крышка содержит ответное отверстие для фиксации вала.

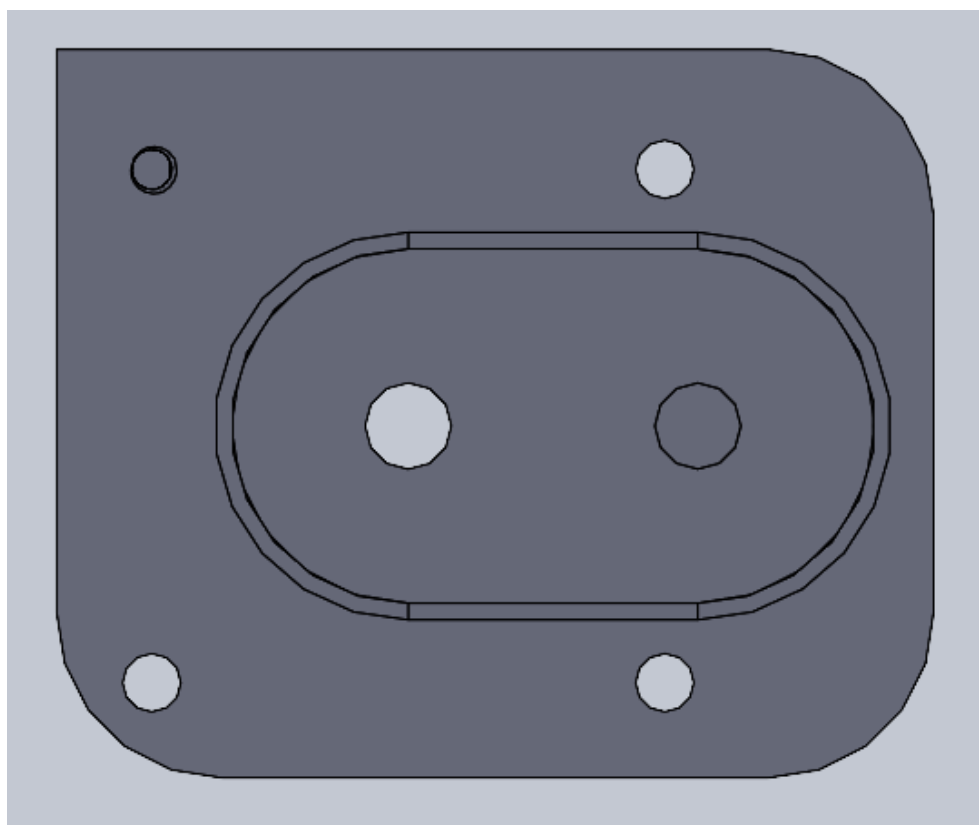


Рисунок 6.1 - Корпус экструдера

Для загрузки используемого материала к верхней части корпуса при помощи резьбовой втулки (см. рис 6.3) крепится бак (см. рис 6.2) объемом 112мл и толщиной стенки 2мм.

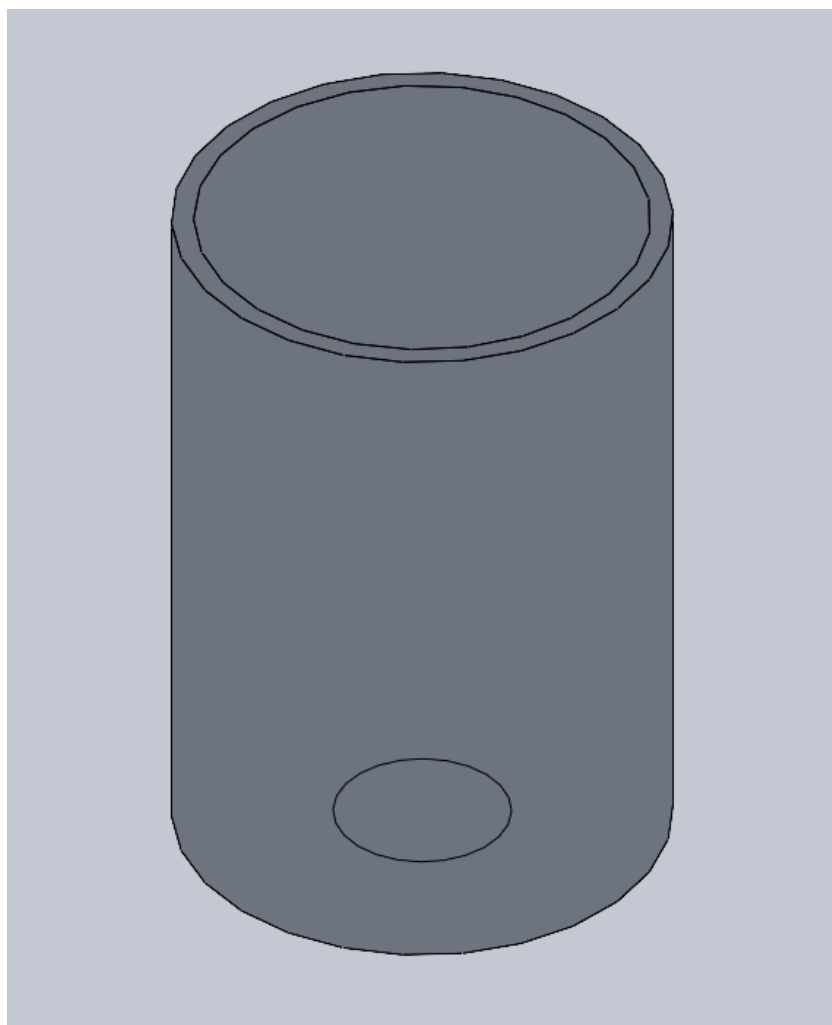


Рисунок 6.2 - Бак экструдера

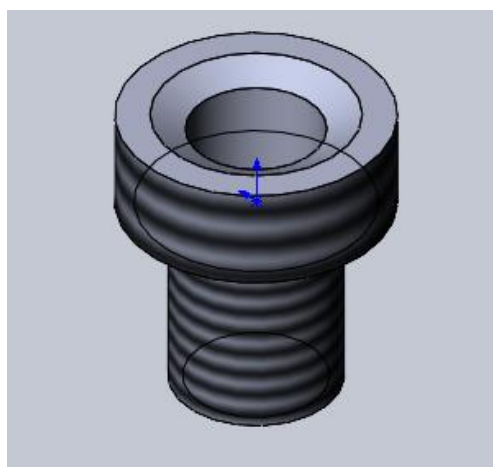


Рисунок 6.3 - Резьбовая втулка

С передней стороны корпус закрывается крышкой (см. рис 6.4), между крышкой и корпусом экструдера устанавливается прокладка в виде пленки (см. рис. 6.5), изготовленной из листового ПЭТ пластика толщиной 0,5мм.

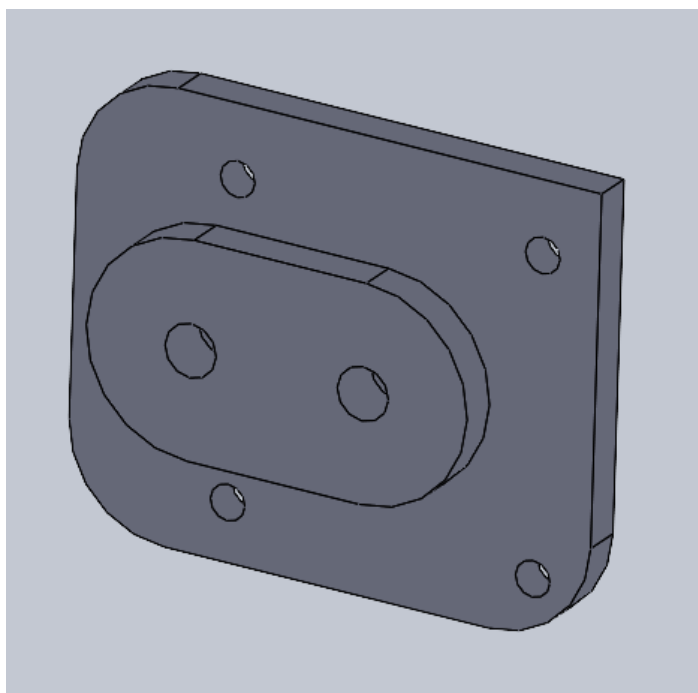


Рисунок 6.4 - Крышка корпуса экструдера

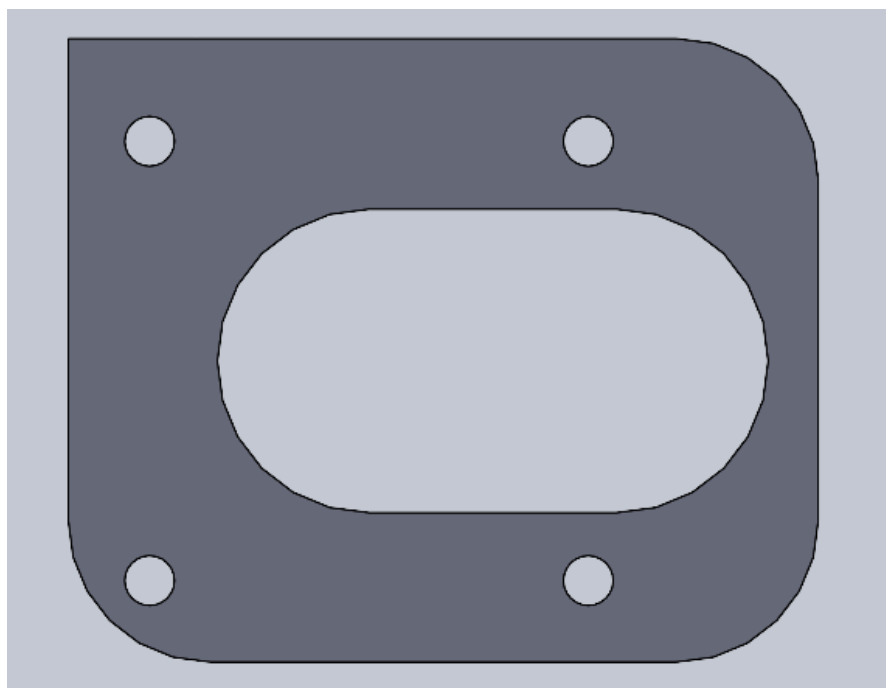


Рисунок 6.5 - ПЭТ прокладка

На рис. 6.6 изображен экструдер в сборе с установленными шестеренками без крышки, на рис.6.7 приведен общий вид полностью собранного экструдера перед установкой на каретку принтера.

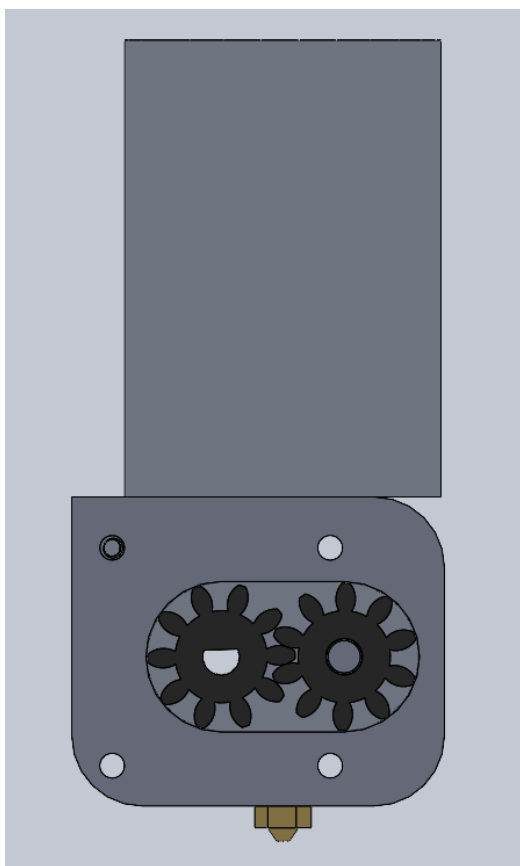


Рисунок 6.6 - Экструдер в сборе,
крышка снята

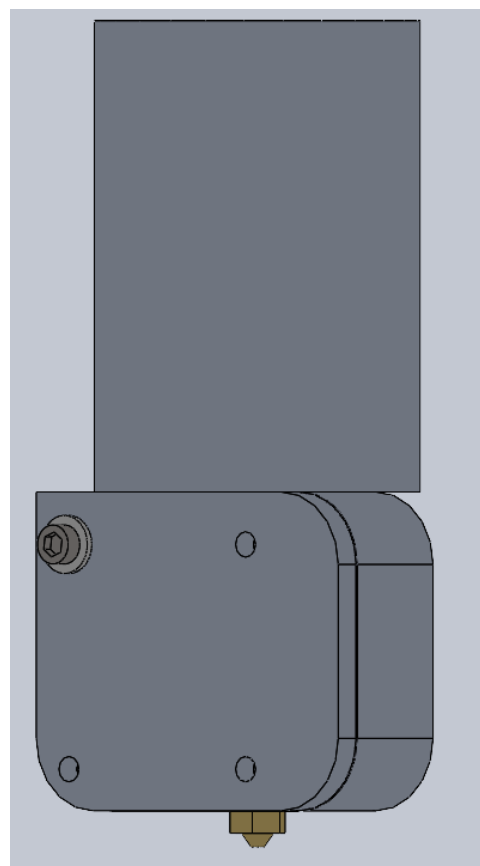


Рисунок 6.7 - Экструдер в сборе

Основные детали экструдера такие как: корпус, крышка и бак изготавливаются из алюминия марки Д16, выбор материала обусловлен высокой теплопроводностью [4], доступностью на рынке и хорошей обрабатываемостью. Корпус и крышка производятся методом фрезерования, а бак – точением.

Шестеренки напечатаны на фотополимерном 3Д-принтере, такой способ позволяет добиться высокой точности изготовления, а также экономически выгоднее и проще по сравнению с другими способами (литье, зубофрезерование и т. д.), так как для большинства методов производства необходим заказ крупной партии.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы был проведен анализ зарубежного и отечественного рынков решений для автоматического создания изделий из воскоподобных материалов, исследован принцип работы насосов шестеренчатого типа. Проведен численный анализ зубчатых колес, результаты которого совпадают с аналитическими решениями производительности. Исследована и подтверждена зависимость производительности шестеренчатых колес от геометрических характеристик рабочих органов – зубчатых колес, при наложении частичных ограничений на геометрию.

По полученным результатам была разработана и смоделирована автоматическая система подготовки и подачи материала, интегрированная с 3D печатью по технологии FDM.

Список использованной литературы

1. Брэдли Г., Морсс Р., Паращак Д. Воск для отливки моделей // Патент RU №2669852. РЕМЕТ ЮКей ЛТД (GB)
2. ГОСТ 3.1129-93 Единая система технологической документации (ЕСТД). Общие правила записи технологической информации в технологических документах на технологические процессы и операции (Переиздание), 1993
3. Иванов М.Н. Детали машин: Учеб. для студентов втузов/Под ред. В.А. Финогенова. — 6-е изд., перераб. — М.: Высш. шк., 2000. — 383 с
4. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г., под ред. Романкова «Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии». Справочник по элементарной физике // Издание девятое, М.: «Наука», 1982 г.
5. Панкратов Е. Построение сеточной модели в Ansys ICEM CFD // Институт Математики, Информационных и Космических Технологий, Северный (Арктический) Федеральный Университет им. М.В.Ломоносова. – 2015
6. Юдин Е. М. Шестеренчатые насосы. Основные параметры и их расчёт. Изд. 2-е, перераб. и доп. - Москва: Машиностроение, 1964. - 238 с.
7. 3D-принтер Picaso Designer X Pro // Top3DShop URL: <https://top3dshop.ru/kupit-3d-printer/picaso-3d-designer-x-pro.html> (дата обращения: 26.05.2022)
8. 3D-принтер Solidscape 3Z PRO // PRIZMA URL: <http://prizma33.ru/3d-printer-solidscape-3z-pro> (дата обращения: 26.05.2022)
9. 3D-принтер 3D Systems ProJet MJP 2500 W // Globaltech3D URL: https://3d.globatek.ru/3d-printers/ProJet_MJP_2500_W/ (дата обращения: 26.05.2022)
10. Воск SS 3Z Build Model // G.Master URL: <https://gold-master.com.ua/easyshop/oborudovanie-solidscape/vosk-ss-3z-build-model.htm> (дата обращения: 26.05.2022)

11. Воск SS 3Z Pro Support Material// G.Master URL: <https://gold-master.com.ua/easyshop/oborudovanie-solidscape/vosk-podderzhka-3z-support-material.htm> (дата обращения: 26.05.2022)
12. Каталог // Филаментарно! URL: <https://filamentarno.ru/catalog.html> (дата обращения: 26.05.2022)
13. Материал VisiJet M3 Procast // Globaltech3D URL: https://3d.globatek.ru/rash_materials/visijetprocastcastableplastic/ (дата обращения: 26.05.2022)
14. Ansys CFX [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <http://caeexpert.ru/product/ansys-cfx> (дата обращения: 26.05.2022)
15. Ansys ICEM CFD [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <http://cae-expert.ru/product/ansys-icem-cfd> (дата обращения: 26.05.2022)