

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**  
Институт прикладной математики и механики  
Кафедра теоретической механики

Работа допущена к защите  
Зав. кафедрой, д.ф.-м.н., проф.  
\_\_\_\_\_ **А. М. Кривцов**  
" \_ " \_\_\_\_\_

**ДИССЕРТАЦИЯ**

**на соискание академической степени**

**МАГИСТРА**

**Тема: Разработка системы транспортировки эксплантированных органов**

Направление: 01.04.03 – Механика и математическое моделирование

Выполнил студент гр.63604/1

Мирошник Г. А.

Руководитель к.ф.-м.н.

Лобода О. С.

Санкт-Петербург  
2017

## **СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ОБЗОР АНАЛОГОВ И ТИПОВЫХ РЕШЕНИЙ .....	5
1.1 Системы искусственного кровообращения .....	5
1.2 Насосы для систем искусственного кровообращения .....	7
2. ОПИСАНИЕ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО УСТРОЙСТВА .....	9
3. РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ СХЕМЫ .....	10
3.1 Разработка кинематической схемы .....	10
3.2 Разработка электрической схемы .....	10
4. РАСЧЁТ МЕХАНИЗМА РЕГУЛИРОВКИ ОККЛЮЗИИ .....	13
4.1 Исходные данные .....	13
4.2 Предварительный расчёт винта .....	14
4.3 Проверка условия самоторможения резьбы .....	14
4.4 Расчёт допустимого осевого усилия в передаче винт-гайка .....	15
5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕЖАТИЯ СИЛИКОНОВОЙ ТРУБКИ .....	17
5.1 Общие сведения .....	17
5.2 Расчётная модель .....	18
5.3 Моделирование линейно-упругого материала .....	21
5.4 Моделирование гиперупругого материала .....	25
6. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ .....	29
6.1 Технологическое оснащение Фаблаб Политех .....	29
6.2 Варианты конструкций .....	31
6.3 Элементная база .....	33
6.4 Изготовление .....	35
7. РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ .....	38

7.1 Правила работы устройства .....	38
7.2 Работа с драйвером ТВ6612FNG .....	38
7.3 Используемые переменные .....	40
7.4 Описание алгоритма и основных процедур .....	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	46
Список литературы .....	47
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. КОМБИНИРОВАННАЯ СХЕМА .....	49
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ЛИСТИНГ ПРОГРАММЫ КОНТРОЛЛЕРА .....	50
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПИСЬМО ПОДДЕРЖКИ ОТ ПСПбГМУ .....	53

## ВВЕДЕНИЕ

Сердечно-сосудистые заболевания до сих пор остаются ведущими причинами смерти в мире, и в 2015 году стали причинами 15 млн. смертей по всему земному шару. [1] В ряде случаев летального исхода можно было бы избежать, прибегнув к трансплантации сердца.

Одной из наиболее актуальных проблем трансплантологии является проблема доставки органов в пригодном для пересадки состоянии, что осложняется условиями перевозки органа.

При перевозке органов в охлаждённом состоянии накладывается серьёзное ограничение по времени, например, охлаждённое до 4 градусов Цельсия сердце пригодно к вживлению акцептору в течение первых 6 часов после удаления сердца у донора, что объясняется отсутствием подачи кислорода и питательных веществ в сердце, из-за чего начинается быстротекущая ишемическая болезнь.

Американскими и голландскими учёными была предложена концепция транспортировки эксплантированных органов *ex vivo*. Предполагается, что орган, перевозимый таким образом, «не ощущает» извлечения из донора и не страдает в процессе перевозки. Результаты испытаний и клинических исследований показали, что допустимое время доставки органа от донора до акцептора при данном подходе увеличивается с 6 до 12 часов, а приживаемость сердца после первого послеоперационного месяца увеличилась с 80% до 97%.

Целью данной дипломной работы является разработка насоса, который может быть использован в исследовании систем искусственного кровообращения и, в первую очередь, в установке для перевозки эксплантированных органов.

# 1. ОБЗОР АНАЛОГОВ И ТИПОВЫХ РЕШЕНИЙ

## 1.1 Системы искусственного кровообращения

В ходе операций на сердце применяется аппарат искусственного кровообращения (АИК). Аппараты бывают разных размеров, но преимущественно являются стационарными устройствами, состоящими из основных частей: венозный и артериальный насосы, система нагрева и оксигенатор. На рисунке 1.1.1 представлена схема подключения аппарата искусственного кровообращения с дополнительными системами мониторинга, ловушками для воздуха и системами фильтрации кровяного раствора.

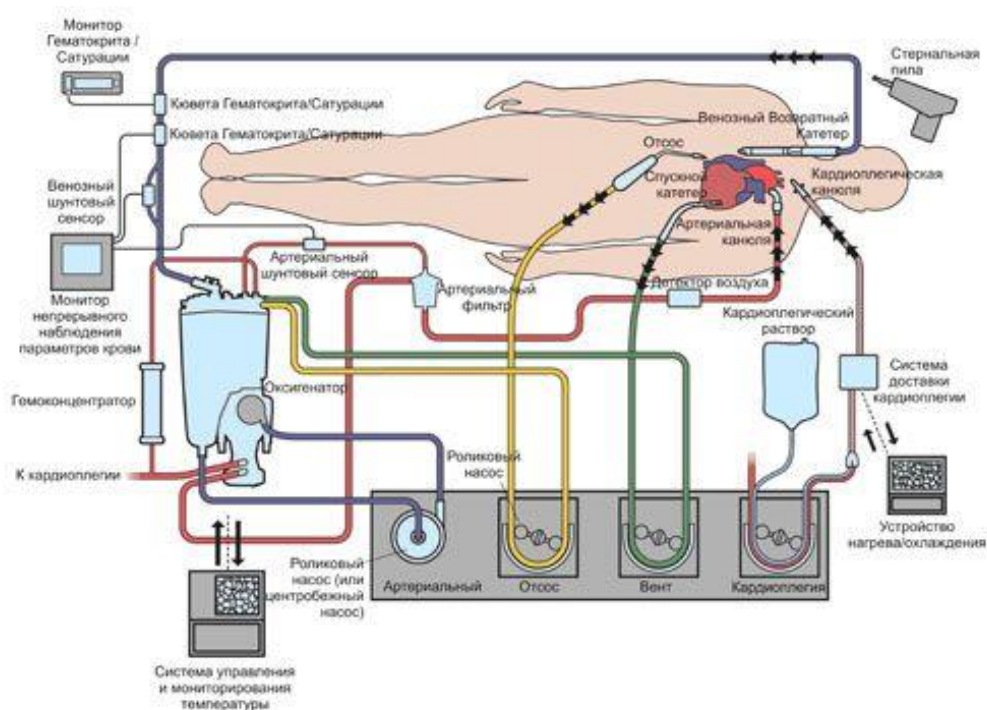


Рисунок 1.1.1 Схема подключения операционного аппарата искусственного кровообращения.

Как упоминалось во введении, на данный момент созданы и проходят клинические испытания две мобильные системы, предназначенные для перевозки эксплантированных сердец, максимально приближенные по характеристикам к аппаратам искусственного кровообращения – Organ Assist, Нидерланды (рисунок 1.1.2) и Organ Care System, Америка

(рисунок 1.1.3). Если Organ Assist представляет собой переносной АИК в чистом виде, то Organ Care System при помощи электрических разрядов позволяет перевозить сокращающееся сердце, прокачивающее через себя раствор кардиopleгии, то есть, в данной системе отсутствует необходимость в насосе.



Рисунок 1.1.2 система Organ Assist



Рисунок 1.1.3 система Organ Care System

Наиболее портативными искусственными системами кровообращения являются вспомогательные устройства для левого желудочка сердца (рисунок 1.1.4), представляющие собой осевой насос, вживляемый в тело пациента с внешним источником питания и системой управления. Данный тип систем искусственного кровообращения носит вспомогательный характер и не требует дополнительных устройств и систем мониторинга.

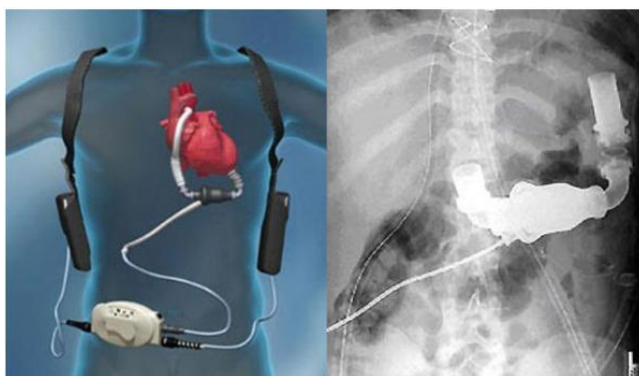


Рисунок 1.1.4 Система Thoratec Heartmate II

## 1.2 Насосы для систем искусственного кровообращения

Для работы с системами искусственного кровообращения подходит далеко не каждый тип насосов, потому что любая инородная частица, попадающая в кровь, вызывает отторжение организмом, выражающееся в воспалительном процессе. Также, согласно требованиям по работе с кровью, детали, контактирующие с кровью должны либо проходить стерилизацию, либо быть утилизированными после использования. Таким образом, из всех типов насосов в системах искусственного кровообращения нашли применение бесклапанные насосы (рисунок 1.2.1), центробежные насосы (рисунок 1.2.2) и осевые насосы (рисунок 1.2.3), причём последние обычно применяются в случаях длительного использования одним пользователем и изготавливаются из титановых сплавов.

Работа бесклапанных, или перистальтических, насосов предполагает проталкивание жидкости через эластичную трубку путём прокатывания по ней роликов или попеременного пережатия её механическими «пальцами». Наиболее распространён камерный насос за счёт простоты конструкции и небольших габаритов.

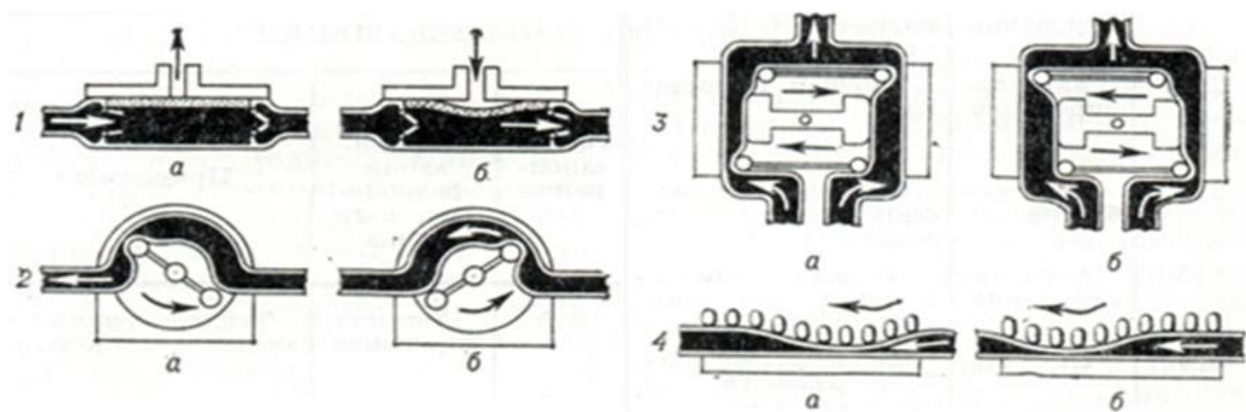


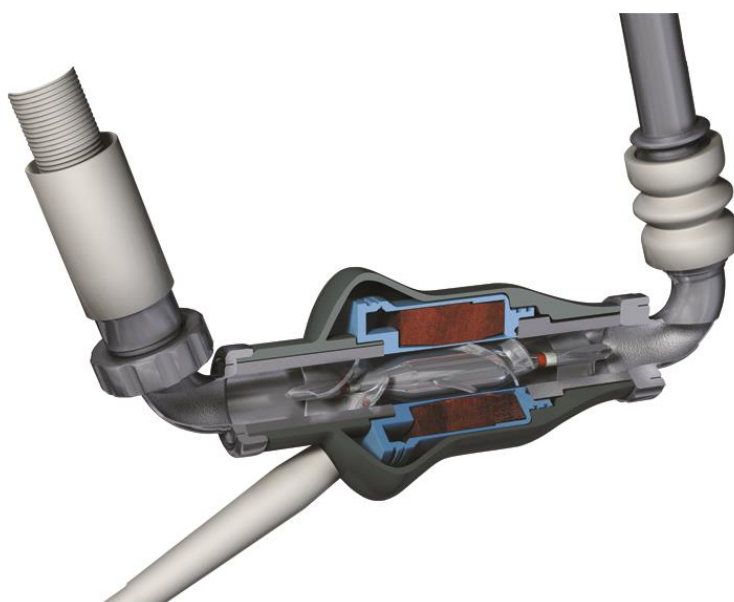
Рисунок 1.2.1. Схемы бесклапанных насосов. 1 – мембранный насос, 2 – камерный насос, 3 – роликовый насос, 4 – пальчиковый насос. Положения а и б иллюстрируют цикл работы насосы.

Современный медицинский центробежный насос представляет собой одноразовую съёмную насадку с импеллером, внутри которого находится

магнит, и магнитный привод, раскручивающий импеллер. Преимущество такого насоса в плавности работы и более «бережной» работе с прокачиваемой кровью: в отличие от камерного бесклапанного насоса центробежный насос не сможет протолкнуть тромб по кровеносной системе и тем самым травмировать её. Однако, из-за дороговизны расходной части насоса, он неприменим в задаче.



Рисунок. 1.2.2. Сменная насадка центробежного насоса с импеллером



Copyright 2007 Thoratec Corporation

Рисунок 1.2.3. Осевой насос, использующийся в системе Heartmate



## 2. ОПИСАНИЕ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО УСТРОЙСТВА

В ходе данной работы разработан перистальтический камерный насос.

Выбор типа насоса обусловлен в первую очередь отсутствием непосредственного контакта между раствором кардиopleгии и подвижными частями насоса. Главные требования к механической части насоса – регулировка окклюзии силиконовой трубки для обеспечения наилучшей работы насоса при заданном диаметре трубки и возможность работы с силиконовыми трубками с диаметрами от 0.25 дюймов до 1 дюйма для использования при перфузии различных органов.

Насос должен обеспечивать объёмную скорость перфузии 0-6 литров в минуту, максимальная объёмная скорость перфузии обусловлена количеством крови, которое прокачивает человеческое сердце. Регулировка объёмной скорости перфузии осуществляется при помощи изменения исходного диаметра силиконовой трубки, используемой при работе с насосом и изменением скорости вращения двигателя.

Насос управляется с приборной панели, на которой располагается дисплей, отображающий текущие параметры работы насоса, кнопки выбора стандартных размеров силиконовых трубок (0.25”, 0.5”, 1”), кнопка включения реверс-режима, кнопка запуска вращения, рукоятка регулировки количества оборотов. Каждая кнопка имеет индикаторный светодиод.

### **3. РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ СХЕМЫ**

Комбинированная схема перистальтического насоса (рисунок 3.1) представляет собой сочетание кинематической, компоновочной, и электрической схемы и позволяет получить наиболее полное и наглядное представление об устройстве и принципе действия машины. [2]

#### **3.1 Разработка кинематической схемы**

Привод насоса выполнен от мотор-редуктора постоянного тока (1). Для получения обратной связи по количеству оборотов в минуту используется встроенный в двигатель магнитный энкодер (2) на базе датчика Холла (3). Вал мотор-редуктора при помощи муфты с фланцем (4) соединён с поворотной платформой (5), на которой располагается четыре одинаковых роликовых узла.

Роликовый узел состоит из пластикового корпуса (6), двух подшипников качения (7), обеспечивающих уменьшение трения в процессе передавливания силиконовой трубки, и винта (8), выполняющего роль оси и соединительного элемента.

Линейное перемещение ложементов (12) для регулировки окклюзии силиконовой трубки в процессе работы насоса осуществляется при помощи передачи скольжения винт-гайка (9). Жёсткость конструкции обеспечивается стальной направляющей с круглым сечением и линейным подшипником качения (10,11). Привод ручной, от рукоятки (13). Впоследствии конструкция может быть доработана с применением шагового двигателя и датчика давления для автоматизации процесса подстройки окклюзии.

#### **3.2 Разработка электрической схемы**

Питание устройства осуществляется через блок питания, преобразовывающий напряжение однофазной сети  $\sim 220V$  50Гц в постоянное напряжение  $-12V$ , питание подаётся через кнопку включения с фиксацией

(Vt7). Постоянное напряжение подаётся на порт Vin контроллера и разъём питания драйвера двигателя постоянного тока TB6612FNG.

С выхода контроллера +5V запитывается логический вход драйвера двигателя постоянного тока, дисплей I2C LCD Display, датчик Холла (3) и потенциометр P1.

Контроллер осуществляет приём сигнала с датчика Холла (3), потенциометра P1, которым настраивается скорость вращения ротора насоса, кнопок управления Vt1-Vt6, отвечающих за запуск насоса, изменение направления вращения, остановку ротора, изменение поправочного коэффициента в расчёт в зависимости от диаметра трубки; управляет работой индикаторных светодиодов LED1-LED5, символьного дисплея и драйвера двигателя постоянного тока.

Драйвер двигателя постоянного тока принимает управляющие сигналы с контроллера посредством портов s1-4 и соединяется с двигателем постоянного тока (1) через выходы OUT1,2.

Четырёхстрочечный символьный дисплей (I2C LCD Display) посредством последовательной асимметричной шины I<sup>2</sup>C соединён с контроллером и занимает порты контроллера SDA (Serial Data) и SCL (Serial Clock), на схеме объединены в I2C bus.

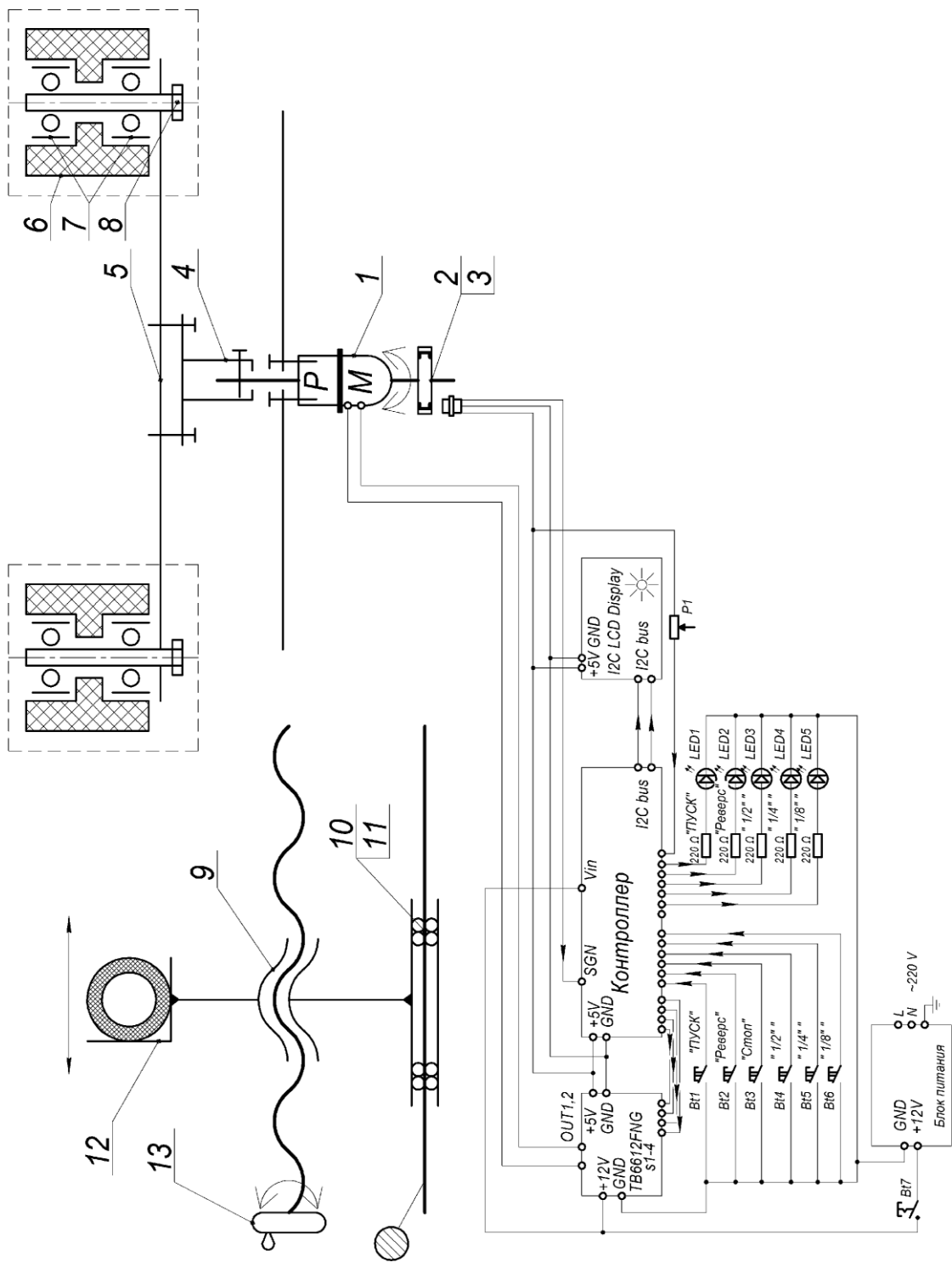


Рисунок. 3.1 Комбинированная схема перистальтического насоса

#### **4. РАСЧЁТ МЕХАНИЗМА РЕГУЛИРОВКИ ОККЛЮЗИИ**

Механизм регулировки окклюзии базируется на передаче винт-гайка. Передача винт-гайка используется для преобразования вращательного движения в поступательное. Достоинствами такой передачи является точность позиционирования, значительный выигрыш в силе, малые габариты, возможность обеспечения самоторможения. В случае, когда необходимы малые перемещения, а КПД не имеет существенного значения, при этом надо обеспечить самоторможение, используют однозаходную метрическую резьбу.

Для расчёта механизма необходимо:

- выяснить усилие, прилагаемое к регулятору, для принятия решения о включении в механизм дополнительной передачи с регулятора на винт;
- рассчитать усилие на выходе передачи винт-гайка для сопоставления с усилием, необходимым для пережатия силиконовой трубки;
- проверить передачу по условию самоторможения для определения необходимости установки тормоза на винт.

##### **4.1 Исходные данные**

Конструктивно приводной элемент механизма регулировки окклюзии выполнен в виде круглого маховика без рукоятки, захват которого производится кистью руки оператора. Согласно основным эргономическим требованиям, указанным в ГОСТ 21752-76, усилие, необходимое для вращения такого регулятора, не должно превышать 1 кгс [3] при диаметре регулятора 50-130 мм.

До проведения компьютерного моделирования пережатия силиконового шланга экспериментально было установлено, что пережатие

шланга можно обеспечить усилием двух пальцев, что не превышает 8 кгс, результат проверен на динамометре ДРП-90.

В передаче используется стальной винт диаметром 8 мм и стальная удлиненная гайка длиной 24 мм с метрической резьбой.

#### 4.2 Предварительный расчёт винта

Для исключения выхода передачи из строя из-за износа витков резьбы, надо провести расчёт по условию износостойкости резьбы.

$$p_{\text{ср}} = \frac{F_a}{\pi \cdot d_{\text{ср}} \cdot \Psi_h \cdot P \cdot \frac{P}{H}} \leq [p_{\text{ср}}] \quad (4.2.1),$$

где  $p_{\text{ср}}$  – среднее рабочее давление в резьбе, Н/мм<sup>2</sup>;

$F_a$  – осевая сила, действующая на винт, Н;

$d_{\text{ср}}$  – средний диаметр резьбы, мм, для резьбы М8х1 равен 7,35 мм;

$\Psi_h \cdot P$  – рабочая высота профиля;  $\Psi_h$  – коэффициент относительной высоты профиля резьбы, для метрической резьбы равен 0,54;  $P$  – шаг резьбы, мм;

$\frac{P}{H}$  – число витков резьбы в гайке;  $H$  – высота гайки, мм;

$[p_{\text{ср}}]$  – допускаемое давление в резьбе, Н/мм<sup>2</sup>, для пары сталь – сталь равно 16 Н/мм<sup>2</sup>.

$$p_{\text{ср}} = \frac{80}{\pi \cdot 7,35 \cdot 0,54 \cdot 24} = 0,27 \text{ Н/мм}^2 \leq 16 \quad (4.2.2),$$

таким образом, условие износостойкости выполняется. [4]

#### 4.3 Проверка условия самоторможения резьбы

Для принятия решения о необходимости дополнительной установки тормоза на ходовой винт, необходимо проверить передачу по условию самоторможения

$$\psi < \varphi' \quad (4.3.1),$$

где  $\psi = \arctg\left(\frac{P_h}{\pi \cdot d_{cp}}\right)$  – угол подъёма винтовой линии резьбы;

$P_h = P \cdot n$  – ход резьбы;  $P$  – шаг резьбы;  $n$  – число заходов;

$\varphi' = \arctg\left(\frac{f}{\cos \gamma}\right)$  – приведённый угол трения;

$f$  – коэффициент трения в резьбе, для пары сталь – сталь равен 0,18;

$\gamma$  – угол наклона рабочей стороны профиля резьбы, для метрической резьбы равен  $30^\circ$ .

$$\arctg\left(\frac{1}{\pi \cdot 7,35}\right) = 2,48 < 11,74 = \arctg\left(\frac{0,18}{\cos 30}\right) \quad (4.3.2),$$

Так как условие самоторможения выполнено, в дополнительном тормозе для винтовой передачи нет необходимости.

#### 4.4 Расчёт допустимого осевого усилия в передаче винт-гайка

Для расчёта максимально допустимой нагрузки необходимо сравнить момент силы, создаваемый оператором на приводном элементе с моментом сил трения и опорных реакций в резьбе.

Момент сил трения и опорных реакций в резьбе определяется по формуле

$$M_{тр} = Q \frac{d_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\psi + \varphi') \quad (4.4.1),$$

где  $Q$  – осевая нагрузка, Н.

Приведённый угол трения  $\varphi'$  и угол подъёма резьбы  $\psi$  возьмём из (5.3.2), тогда максимальное осевое усилие  $Q_{\max}$

$$Q_{\max} = \frac{2 \cdot F_o \cdot R}{d_{cp} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \varphi')} \quad (4.4.2),$$

где  $F_o$  – усилие, создаваемое оператором, Н;

$R$  – радиус приводного элемента, мм. Примем минимальное допустимое значение радиуса – 25 мм.

$$Q_{\text{макс}} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 25}{7,35 \cdot \text{tg}(2,48 + 11,74)} = 268,44 \text{ Н} = 26,84 \text{ кгс} \quad (4.4.3)$$

Таким образом, оператор, прикладывая усилие, не превышающее указанное в государственном стандарте для управляющих маховиков, может преодолевать сопротивление, создаваемое усилием почти в 27 килограмм. Однако, в государственном стандарте для регуляторов и переключателей [5] для аналогичных размеров устанавливается допустимое усилие перемещения приводного элемента 1,6 Н.

$$Q_{\text{макс}} = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 25}{7,35 \cdot \text{tg}(2,48 + 11,74)} = 42,95 \text{ Н} = 4,30 \text{ кгс} \quad (4.4.4)$$

Следующие в ряду размеры приводных элементов и усилий – 60 мм, 3,3 Н и 70 мм, 4,2 Н. Рассчитаем допустимые усилия для выбора размера рукоятки.

$$Q_{\text{макс}} = \frac{2 \cdot 3,3 \cdot 30}{7,35 \cdot \text{tg}(2,48 + 11,74)} = 106,30 \text{ Н} = 10,63 \text{ кгс} \quad (4.4.5)$$

$$Q_{\text{макс}} = \frac{2 \cdot 4,2 \cdot 35}{7,35 \cdot \text{tg}(2,48 + 11,74)} = 157,85 \text{ Н} = 15,79 \text{ кгс} \quad (4.4.6)$$

Сравнив результаты, полученные в (4.4.5) и (4.4.6) с ожидаемой нагрузкой и усилием оператора, было принято решение остановиться на диаметре рукоятки 65 мм для удовлетворения минимальным условиям для регуляторов и созданием запаса по усилию, чтобы компенсировать возможные неточности в расчёте нагрузки, создаваемой ротором насоса.



## 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕЖАТИЯ СИЛИКОНОВОЙ ТРУБКИ

Для проверки расчётов в разделе 5 необходимо провести моделирование пережатия силиконовой трубки при помощи систем САЕ. Моделирование проведём в САПР SolidWorks.

### 5.1 Общие сведения

SolidWorks использует метод конечных элементов (МКЭ). МКЭ принят в качестве стандартного метода анализа благодаря его универсальности и пригодности для работы на компьютерах. МКЭ делит модель на много малых частей простых форм, называемых элементами, эффективно заменяющими сложную задачу несколькими простыми, которые необходимо решить совместно. Минимальное количество узлов, определяющих элемент, равно трём, однако SolidWorks использует элементы как минимум с четырьмя узлами (рисунок 5.1.1 и 5.1.2), так как при создании сетки с тремя узлами могут образовываться разрывы в сетке. [6]

Каждый узел в сетке описывается параметрами, зависящими от типа расчёта. Например, для расчетов конструкции реакция узла представляется, в целом, тремя перемещениями и тремя вращениями, которые называются степенями свободы.

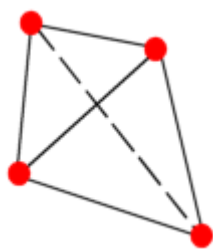


Рисунок 5.1.1 Линейный тетраэдральный твёрдотельный элемент

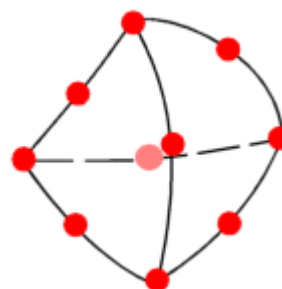


Рисунок 5.1.2 Параболический тетраэдральный твёрдотельный элемент

Для решения систем уравнений SolidWorks использует два подхода: прямого решения разреженных матриц (Direct Sparse) и итеративного решения разреженных матриц (FFEPlus).

Каждый из узлов описывается следующим образом: известны координаты элемента; номера узлов, в которых элемент связан с другими элементами; дополнительные геометрические параметры элемента; свойства материала.

Дополнительная информация, позволяющая получить единственное решение задачи и определить глобальную матрицу, задаётся в виде граничных условий и условий закреплений.

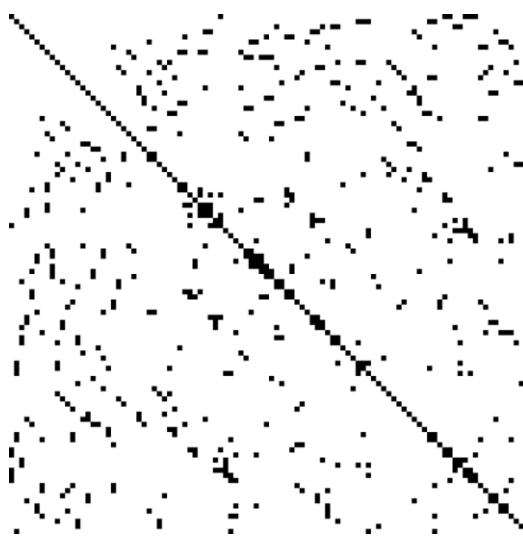


Рисунок 5.1.3 Пример разреженной матрицы.  
Точками обозначены заполненные ячейки

Вычислительная программа, используя данные о расчётной модели, вычисляет матрицы жёсткости элементов и нагрузки на элементах, формирует вектор внешних нагрузок и глобальную матрицу жёсткости, накладывает на элементы заданные связи и проводит треугольное разложение глобальной матрицы. Далее программа решает систему линейных уравнений и вычисляет вектор линейных перемещений для элементов, по которому вычисляются деформации, напряжения и усилия на элементах.

## 5.2 Расчётная модель

Задача данного расчёта – вычислить усилие, оказываемое на ходовой винт направляющей и силиконовой трубкой, находящейся под давлением

ролика, при этом неизвестна сила упругости, стремящаяся вернуть силиконовую трубку в разжатое состояние.

Для приближения результатов моделирования к реальности был взят фрагмент сборки, содержащий ложемент, силиконовую трубку и один ролик (подшипники и ось вращения в моделировании не используются). Для упрощения модели направляющая силиконовой трубки, каретка и ходовой винт были объединены в одну деталь. Параметры материалов указаны в таблице 5.2.1. При моделировании рассматривается половина ложемента с трубкой, так как модель симметрична. Расчётная модель и схема закреплений указана на рисунке 5.2.1

Таблица 5.2.1 Параметры материалов

Величина	Единица измерения	Ролик (ABS)	Направляющая (Акрил)
Модуль упругости	Н/м <sup>2</sup>	200000000	300000000
Коэффициент Пуассона	Не применимо	0.39	0.35
Модуль сдвига	Н/м <sup>2</sup>	318900000	890000000
Массовая плотность	кг/м <sup>3</sup>	1020	1200
Предел прочности при растяжении	Н/м <sup>2</sup>	30000000	73000000
Коэффициент теплового расширения	1/К	Не указан	0.00052
Теплопроводность	W/(м·К)	0.23	2.55
Удельная теплоемкость	J/(кг·К)	1386	1500

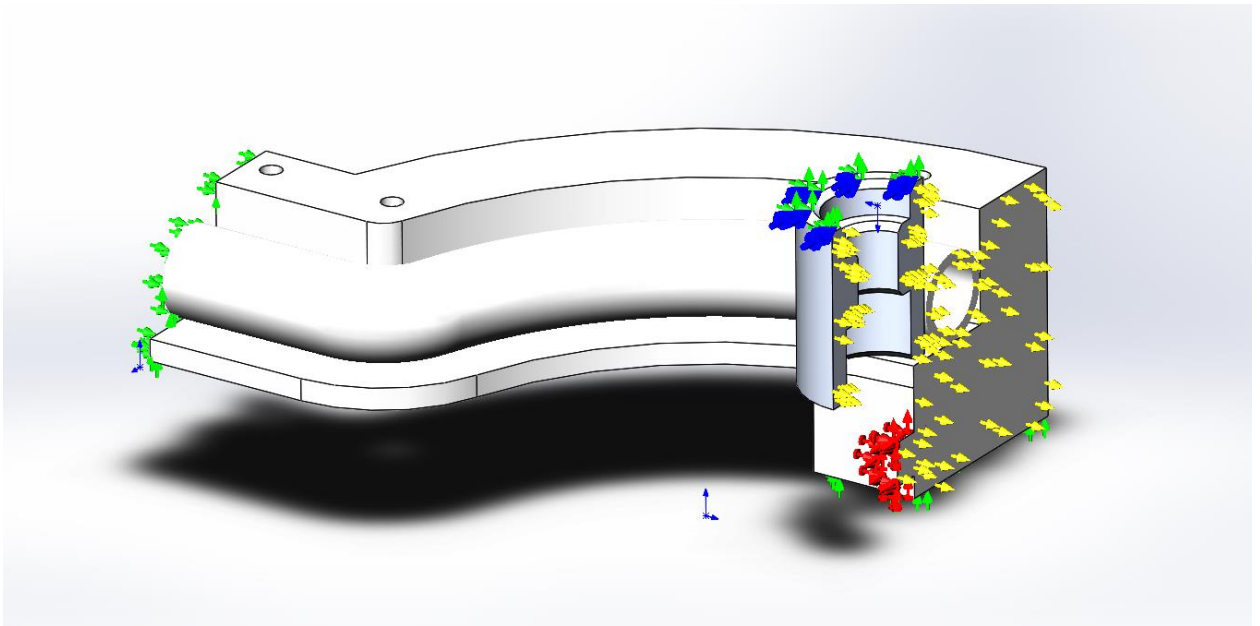


Рисунок 5.2.1 Расчётная модель и схема закреплений

Граничные условия:

- поверхность винта – зафиксировано по XYZ (обозначено красным)
- верхняя плоскость ролика – зафиксирована по плоскостям XZ и XY (имитирует закрепление ролика на поворотной платформе, обозначено зелёным)
- свободный конец силиконовой трубки и направляющей – зафиксированы по плоскостям XZ и YZ (имитирует закрепление свободного конца направляющей на узле линейного перемещения, обозначено зелёным)
- симметрия модели относительно плоскости YZ (обозначено жёлтым)

Нагрузка:

- Перемещение ролика по оси Z на 12,2 мм (обозначено синим)

Условия контакта:

- исключение самопересечения внутренней поверхности трубки

- контакт трубка-ролик с исключением взаимного пересечения
- контакт трубка-направляющая с исключением взаимного пересечения

### 5.3 Моделирование линейно-упругого материала

Для первичного моделирования используется модель линейно-упругого материала (linear-elastic material). Данные о материале для моделирования взяты из статьи “Silicone rubbers” на сайте AZoM, специализирующемся на консолидации информации и данных тестов о материалах. Данные, использованные при определении материала, приведены в таблице 5.3.1.

Для того чтобы опробовать модель, была построена сетка из 11 845 элементов с уплотнением количества элементов в области контакта (рисунок 5.3.1).

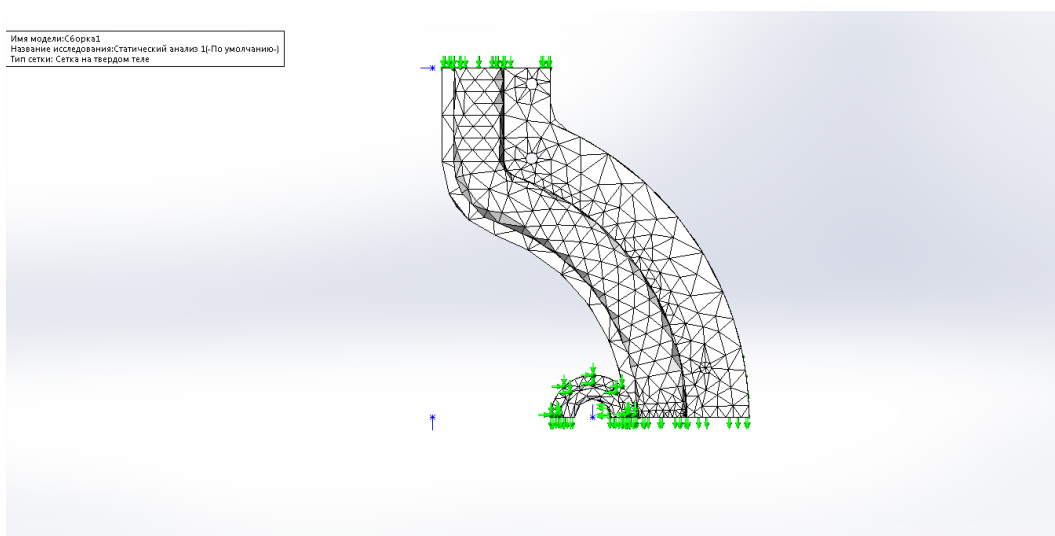


Рисунок 5.3.1 Сетка из 11 845 элементов

Результаты моделирования представлены на рисунке 5.3.2 и 5.3.3. Как видно, характер деформации трубки и величина реакции направляющей (124 Н) соответствует ожидаемым и находится в пределах значений, найденных в разделе 5.

Таблица 5.3.1 Параметры силикона [7]

Величина	Значение	Единица измерения
Модуль упругости	50000000	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	0.49	Не применимо
Модуль сдвига	20000000	Н/м <sup>2</sup>
Массовая плотность	2300	кг/м <sup>3</sup>
Предел прочности при растяжении	5500000	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент теплового расширения	0.0003	1/К
Теплопроводность	2.55	W/(м·К)
Удельная теплоемкость	1300	J/(кг·К)

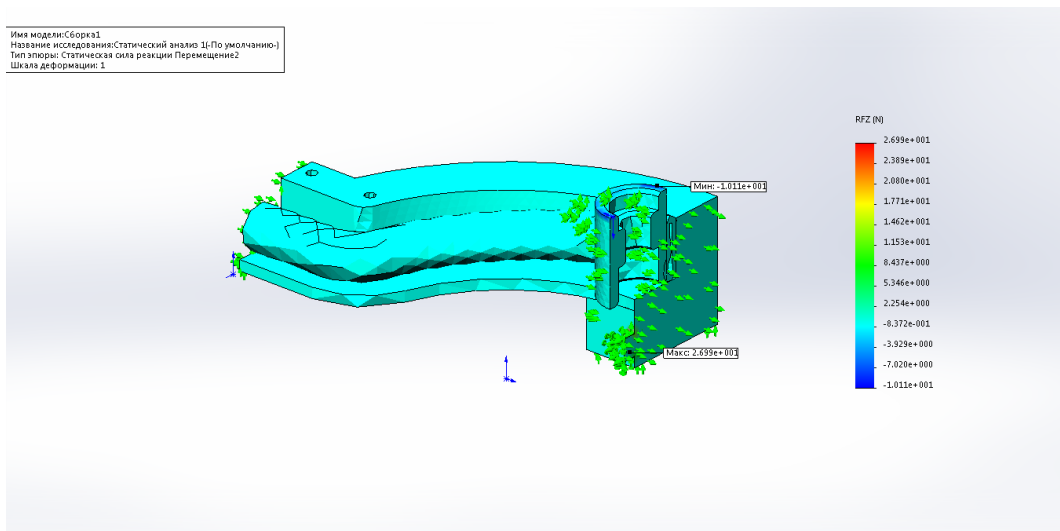


Рисунок 5.3.2 Эпюра сил реакции по оси Z для сетки с 11 845 элементов

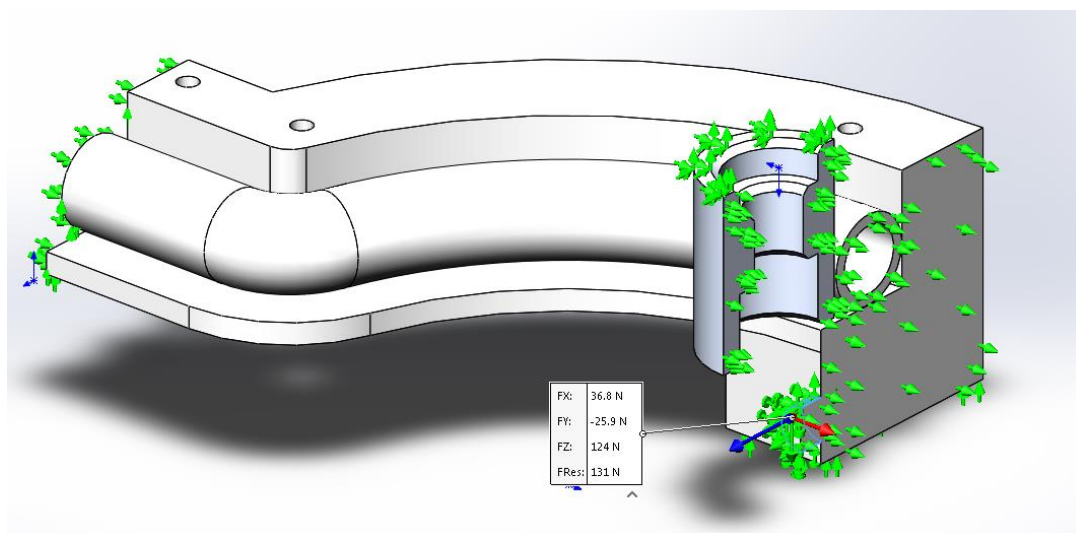


Рисунок 5.3.3 Сила реакции на поверхности закрепления

Чтобы удостовериться в правильности расчётов, необходимо проверить сходимость по сетке. Для этого были выполнены вычисления на сетках с большим количеством элементов. Максимальное количество элементов сетки – 1 119 200, сетка и результаты моделирования представлены на рисунках 5.3.4, 5.3.5 и 5.3.6 соответственно. Результат моделирования – 87,6 Н, что меньше полученного допустимого значения в (4.4.5), проверка пройдена.

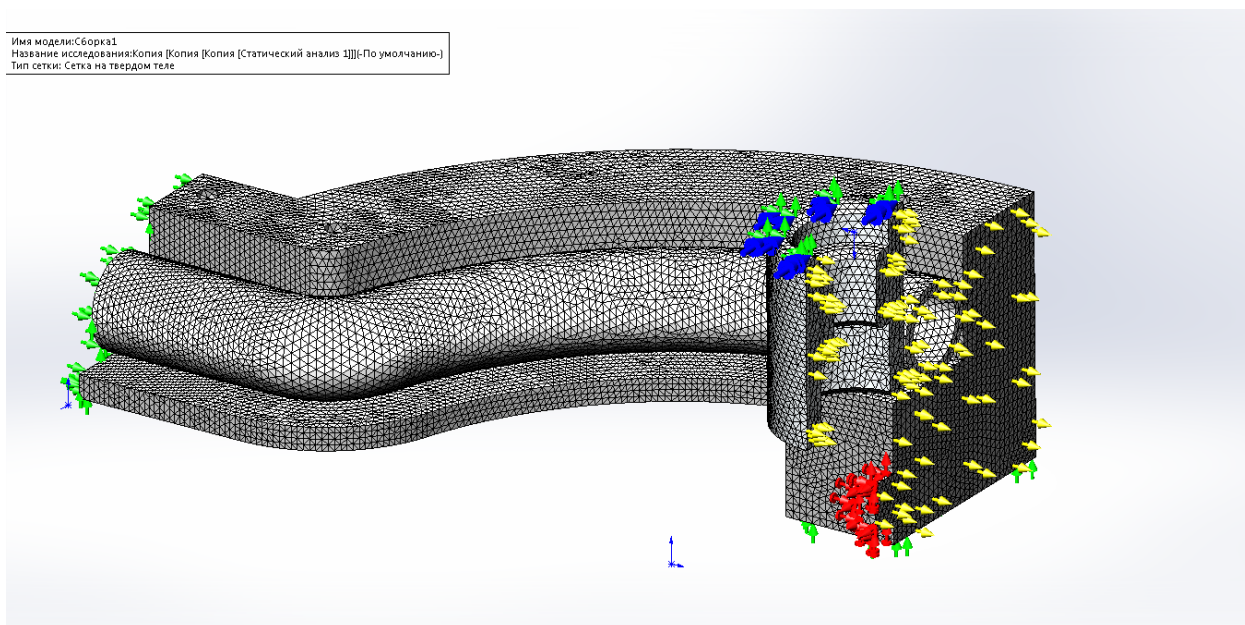


Рисунок 5.3.4 Сетка из 1 119 200 элементов

Имя модели: Сборка1  
 Название исследования: Копия [Копия [Статический анализ 1]] - По умолчанию -  
 Тип Элемент: Статическая сила реакции Перемещение2  
 Шкала деформации: 1

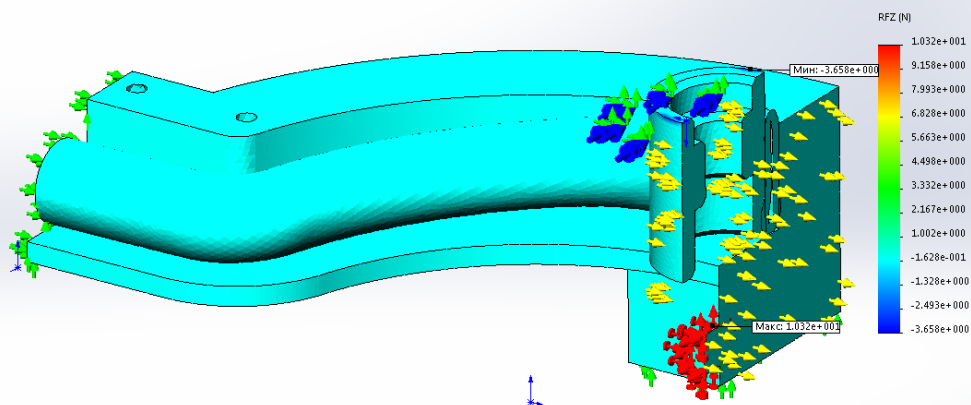


Рисунок 5.3.5 Эпюра сил реакции по оси Z для сетки с 1 119 200 элементов

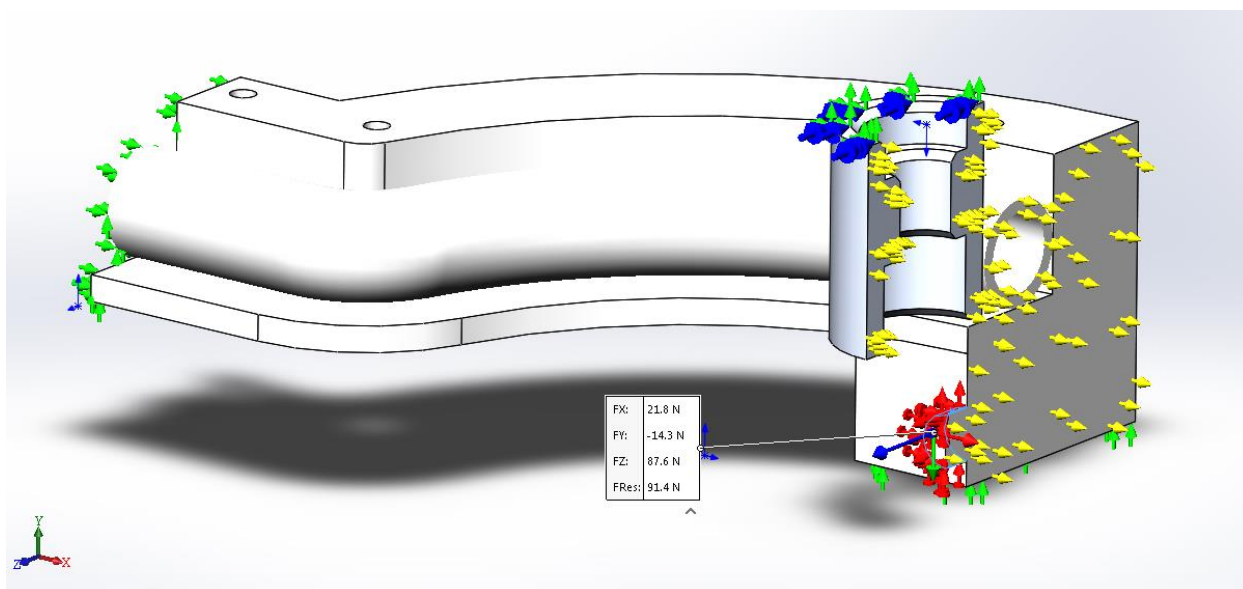


Рисунок 5.3.6 Сила реакции на поверхности закрепления для сетки из 1 119 200 элементов

Результаты моделирования промежуточных сеток и графики сходимости решений представлены на рисунке 5.3.7 и в таблице 5.3.2

Таблица 5.3.2 Результаты исследования сходимости

Количество элементов	Сила реакции по оси Z, Н	Отклонение от предыдущего значения
11845	124	100%
32841	101	23%
98301	94	7%
414725	89,7	5%
1119200	87,6	2%



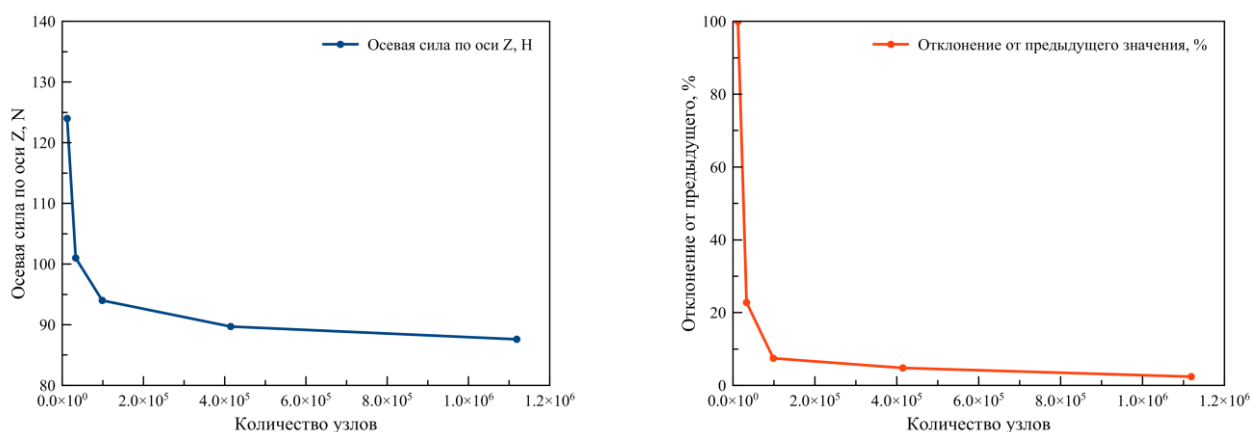


Рисунок 5.3.7 Графики зависимости осевой силы по оси Z и отклонения её величины от количество элементов сетки

#### 5.4 Моделирование гиперупругого материала

При разработке изделий из резин и эластомеров – материалов, способных выдерживать сильные деформации на растяжение и сжатие с возвращением в исходную форму, применяют модель гиперупругого материала (hyperplastic material).

Модель Муни-Ривлина, одна из шести основных моделей, использующихся для моделирования гиперупругих материалов. Для определения свойств материала необходимо экспериментально вычислить две материальные константы, да чего проводятся исследования на прессе с измерением напряжений материала. Такие исследования не являются сильно дорогостоящими (около 1000\$ на 2015 год), но не являются целесообразными в рамках данной работы. [8]

Альтернативой является приведение в соответствие параметров модели Муни-Ривлина твёрдости силикона по Шору (шкала А), т.е. задокументированной характеристикой силиконового изделия. Ниже приведён график и таблица соответствия твёрдости по Шору параметрам модели гиперупругого материала.

## SHORE HARDNESS SCALES

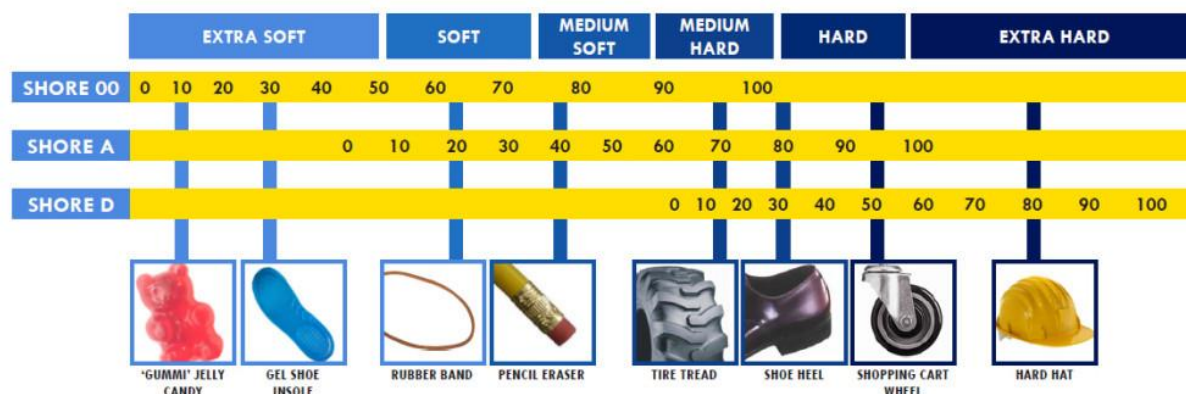


Рисунок 5.4.1 Соответствие различных изделий твёрдости по Шору.

Таблица 5.4.1 Соответствие параметров модели  
Муни-Ривлина твёрдости по Шору

Shore A	C10, MPa	C01, MPa	Shore A	C10, MPa	C01, MPa
0	0	0	18	0,187	0,046
1	0,001	0	19	0,204	0,05
2	0,003	0	20	0,22	0,055
3	0,006	0,001	21	0,238	0,059
4	0,012	0,003	22	0,255	0,063
5	0,019	0,004	23	0,274	0,068
6	0,027	0,006	24	0,292	0,073
7	0,036	0,009	25	0,312	0,077
8	0,047	0,011	26	0,332	0,083
9	0,058	0,014	27	0,354	0,088
10	0,07	0,017	28	0,376	0,094
11	0,083	0,02	29	0,399	0,099
12	0,097	0,024	30	0,424	0,106
13	0,111	0,027	31	0,45	0,112
14	0,125	0,031	32	0,478	0,119
15	0,14	0,035	33	0,508	0,127
16	0,155	0,038	34	0,54	0,134
17	0,171	0,042	35	0,574	0,143

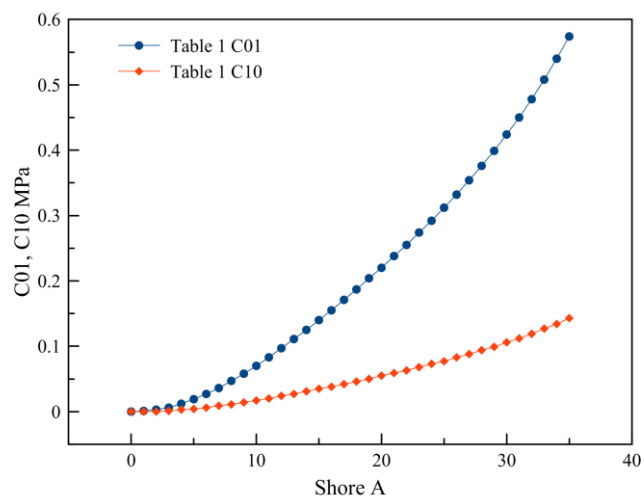


Рисунок 5.4.2 График зависимости параметров материала по модели Муни-Ривина от твердости по Шору

Для использования в перистальтических насосах используются мягкие силиконовые трубки твердостью 25-35 по Шору. Для расчёта возьмём среднее значение 30 и параметры материала, соответствующие этому значению – C01 0.424 МПа и C10 0.106 МПа. [9]

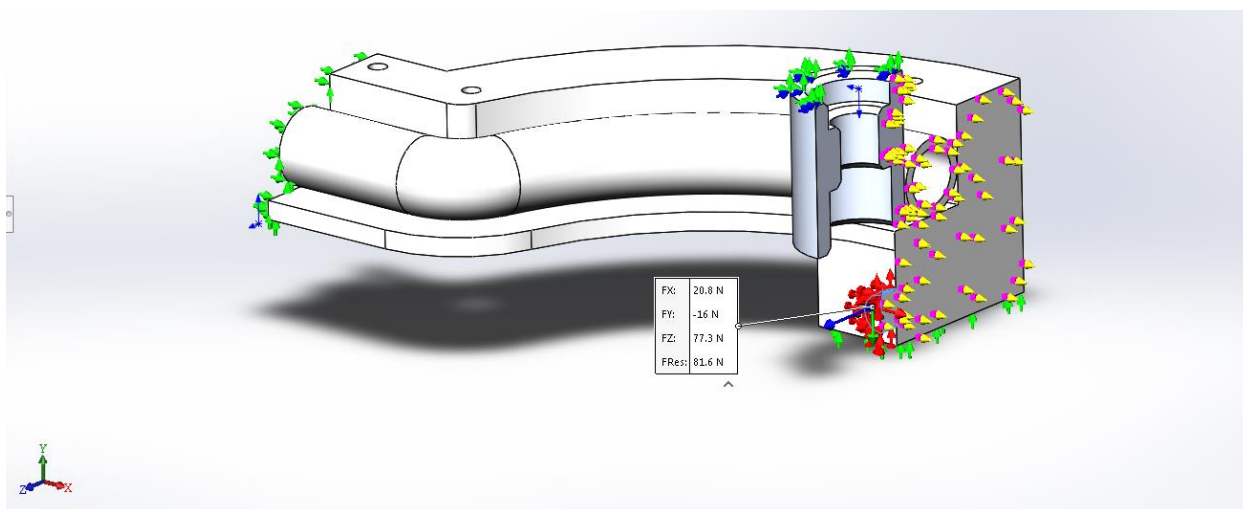
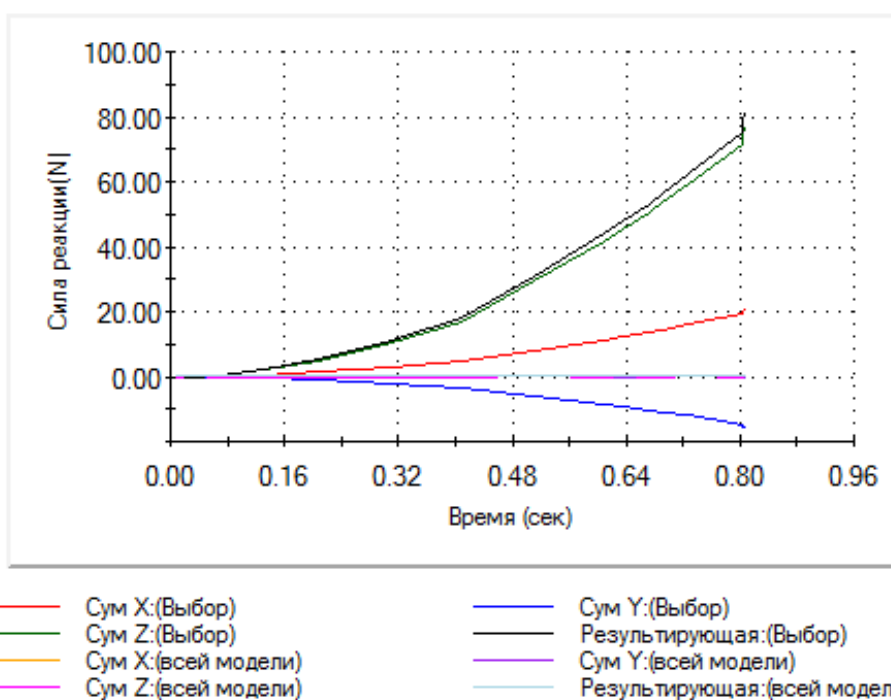


Рисунок 5.4.3 Результат нелинейного моделирования.

Название исследования: Нелинейное 11  
Тип эюры: Сила реакции



0.918965, -50.4762

Рисунок 5.4.4 График изменения силы реакции по выбранной плоскости

## **6. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ**

Разработка и изготовление опытного образца выполнялась на базе лаборатории цифрового производства Фаблаб Политех, покупка комплектующих осуществлялась за счёт средств разработчика, так что основными требованиями к конструкции являлись:

- технологичность изделия
- соответствие технологическим возможностям лаборатории
- использование доступных в Санкт-Петербурге комплектующих и материалов

### **6.1 Технологическое оснащение Фаблаб Политех**

Фаблаб Политех – открытая лаборатория цифрового производства, специализирующаяся на прототипировании и изготовлении изделий с применением оборудования с числовым программным управлением. В ходе работы над проектом было использовано следующее оборудование:

#### **3D-принтер DF-kit F36**

- Технология печати: FDM
- Рабочая область: 300x300x300 мм
- Диапазон рабочих температур экструдера: 120-300 С°
- Максимальная температура нагревательной платформы: 120 С°
- Материалы печати: ABS, PLA, Нейлон
-



Рисунок 6.1.1 3D-принтер DF-kit F36

### Лазерный станок StepDir

- Тип лазера: углекислотный (CO<sub>2</sub> лазер)
- Рабочая область: 1500x2500 мм
- Мощность лазера: 130 Вт
- Материалы: неметаллы без содержания хлора



Рисунок 6.1.2 Лазерный станок StepDir150250

### Лазерный станок Epilog mini 24

- Тип лазера: углекислотный (CO<sub>2</sub> лазер)
- Рабочая область: 600x300 мм
- Мощность лазера: 60 Вт
- Материалы: неметаллы без содержания хлора



Рисунок 6.1.3 Лазерный станок Epilog mini 24

## 6.2 Варианты конструкций

В ходе разработки устройства были рассмотрены и протестированы различные технические решения, в первую очередь связанные с механизмом регулировки окклюзии.

Первоначально предполагалось пойти по традиционному пути с регулировкой при помощи системы рычагов, находящихся на вращающейся части насоса, однако данный вариант обладает двумя существенными ограничениями. Первое – в такой конструкции отсутствует возможность регулировки окклюзии по ходу использования насоса; второе – не технологичность рычагов. Образцы, изготовленные методом 3D-печати, были слишком хрупкими; для продолжения работы в этом направлении необходимо изготавливать детали либо из металла либо из пластика, литьём под давлением, что невозможно в рамках данной работы.

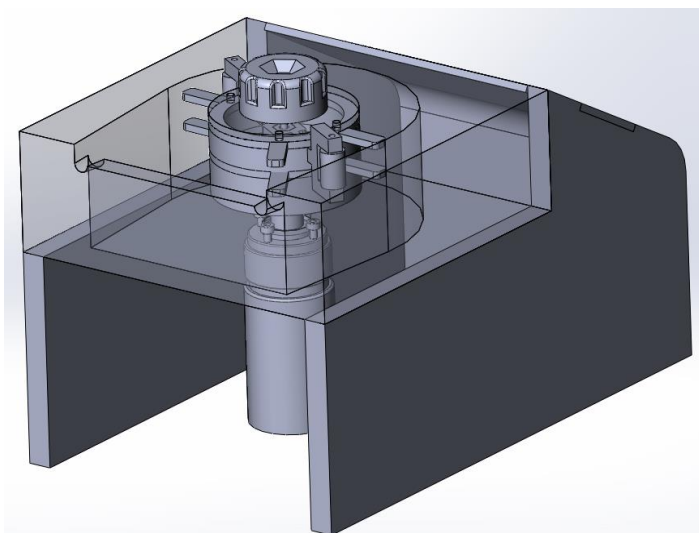


Рисунок 6.2.1 Модель насоса с рычажной системой регулировки окклюзии

В качестве альтернативы системе рычагов была рассмотрена конструкция с пережатием трубки при помощи изменения расстояния между направляющей силиконовой трубкой и вращающейся частью насоса. Такой вариант не требует изготовления прочных деталей маленьких размеров, но при такой конструкции проблематично определять объёмную скорость перфузии без расходомера из-за изменяющейся длины окружности, которую может захватывать ротор насоса. Также в данной конфигурации пережатию трубки роликами мешает поворотная платформа, что устраняется изменением диаметра ролика и изменением высоты платформы.

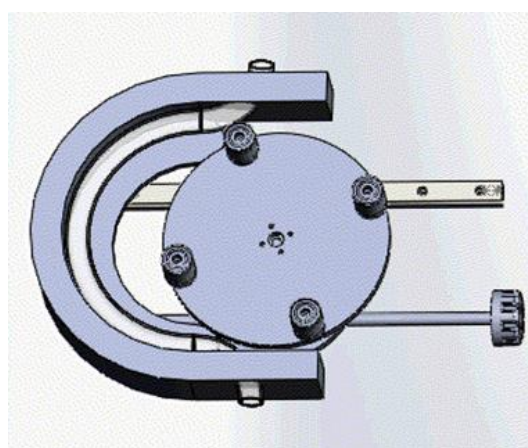


Рисунок 6.2.2 Модель насоса с подвижной вращающейся частью

Финальная конфигурация насоса отличается от предыдущей наличием пары круглых направляющих вместо одной рельсовой, подвижной направляющей силиконовой трубки, статичным ротором насоса и



изменённым положением роликов, благодаря которому ничто не препятствует пережатию трубки любого используемого диаметра.

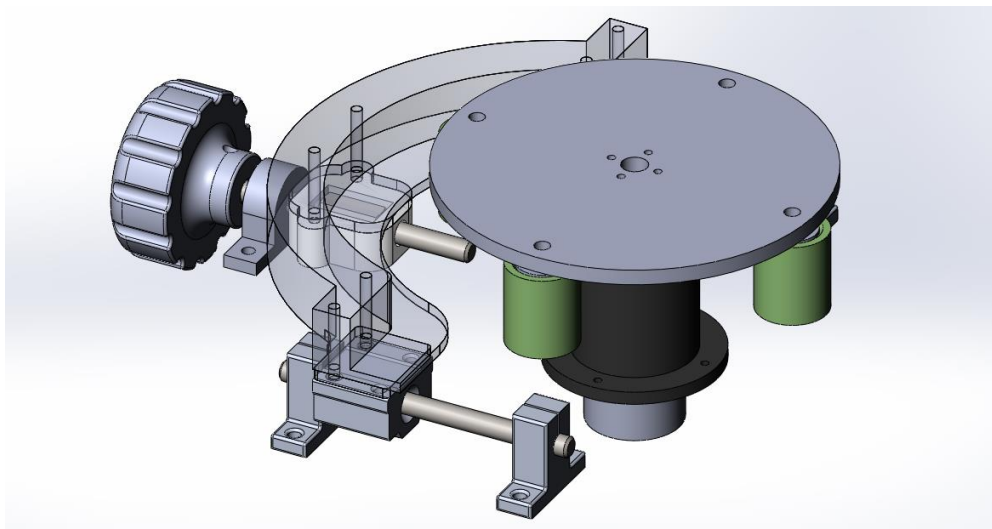


Рисунок 6.2.3 Финальная конфигурация насоса

### 6.3 Элементная база

В качестве привода насоса был выбран двигатель постоянного тока IG-32PGM с планетарным редуктором 1/19 (рисунок 7.3.1), работающий от 12 В. Максимальная скорость вращения 257 об/мин, крутящий момент 3.3 кг·см. Номинальный потребляемый ток не больше 1630 мА. Для управления направлением и скоростью вращения двигателя был выбран двухканальный драйвер на базе микросхемы TB6612FNG (рисунок 6.3.2), работающий с напряжением 4.5-15 В и током до 1200 мА на канал в возможных кратковременными нагрузками до 3000 мА.



Рисунок 6.3.1 Мотор-редуктор IG-32PGM

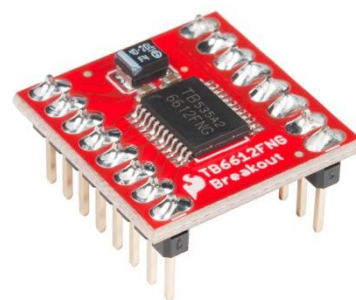


Рисунок 6.3.2 Драйвер двигателя постоянного тока TB6612FNG

Для вывода визуальной информации выбрана комбинация жидкокристаллического дисплея LCD2004 и I2C контроллера (рисунки 6.3.3 и 6.3.4 соответственно), последний необходим для того, чтобы сократить количество выводов, используемых дисплеем для передачи данных с 18 до двух и упрощения взаимодействия с дисплеем при помощи специальной библиотеки `LiquidCrystal_I2C.h`.



Рисунок 6.3.3 Дисплей LCD2004



Рисунок 6.3.4 I2C контроллер

Из покупных конструкционных элементов были использованы держатели линейных направляющих с круглым профилем SK8, линейные подшипники качения в корпусе SCS8UU и корпусные радиальные подшипники с фиксацией вала P08. Выбор типоразмера обусловлен тем, что валы, ходовые винты и направляющие диаметром 8 мм являются наиболее распространёнными среди станкостроителей-непрофессионалов и, как следствие, наиболее распространёнными в продаже. Кроме того, использование направляющих и корпусных деталей этого типоразмера позволит гарантировать жёсткость и прочность конструкции с большим запасом, так как нагрузки в устройстве заведомо меньше допустимых для используемых деталей.



Рисунок 6.3.5 Держатели направляющих SK8, модули линейного перемещения SCS8UU, корпусные подшипники P08.

## 6.4 Изготовление

При помощи оборудования, указанного в разделе 5.1, были изготовлены следующие детали: ролики, рукоятка, каретка, направляющая для силиконовой трубки, стакан для двигателя, платформа насоса. Детали были при возможности разбиты на плоские составляющие, чтобы их можно было изготовить на лазерном станке. Выбор в пользу увеличения количества деталей, изготавливаемых лазерной резкой, был сделан из-за преимущества по скорости изготовления деталей.

Для формирования управляющих программ было использовано программное обеспечение Cura 15.04 для 3D-принтера и LaserWork V6 для лазерного станка. Во время предварительного расчёта времени изготовления деталей было выяснено, что общее станочное время – 18 часов, из которых 17 часов 45 минут занимает работа 3D-принтера. Непосредственно во время изготовления было замечено, что общее время печати составило приблизительно 26 часов, увеличившись за счёт сбояв на различных стадиях печати, а время резки составило 20 минут из-за повторной обработки не прорезанных элементов.

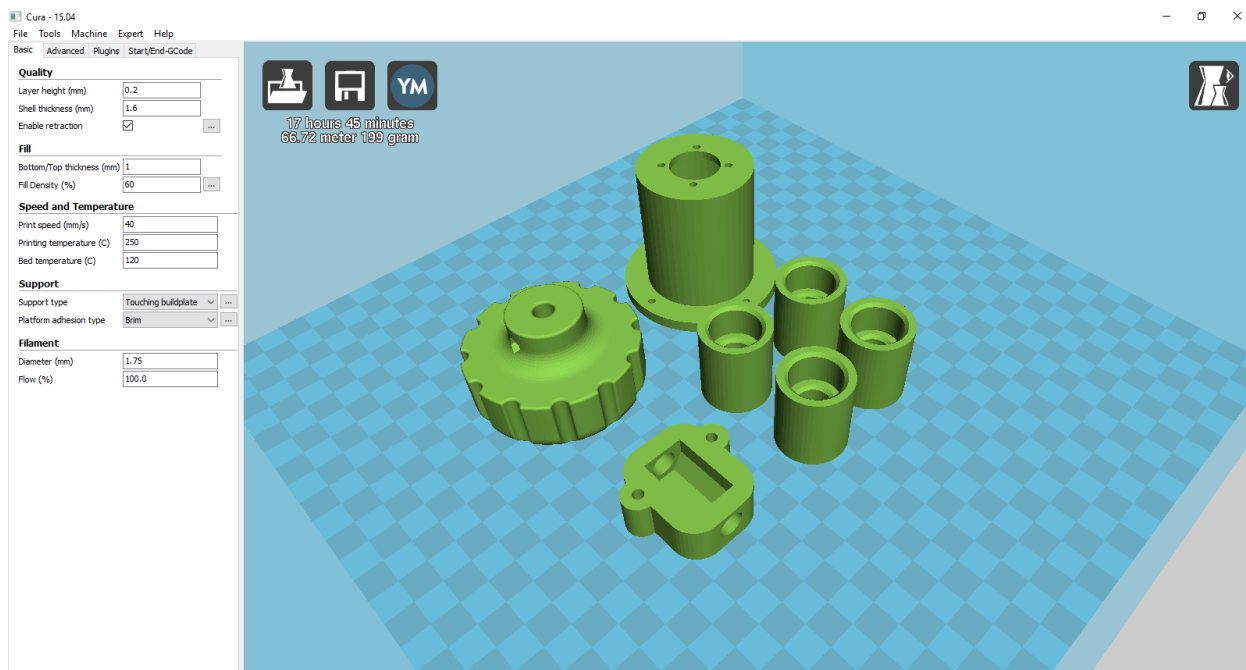


Рисунок 6.4.1 Интерфейс программы Cura 15.04 с деталями, изготовленными методом 3D-печати

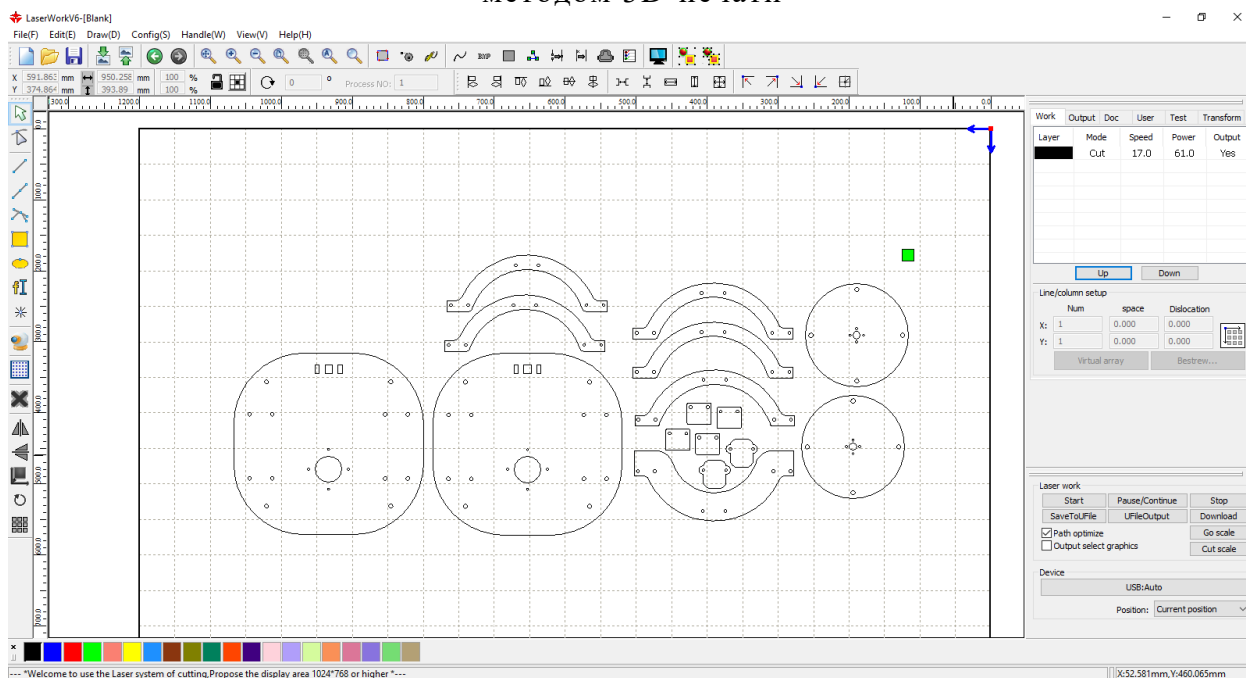


Рисунок 6.4.2 Интерфейс программы LaserWork V6 с деталями, изготовленными лазерной резкой

Для изготовления деталей были выбраны следующие материалы: ABS-пластик и PMMA (оргстекло). При примерно одинаковой стоимости ABS имеет лучшие физические свойства и более высокую устойчивость к температурам и ультрафиолету по сравнению с PLA. Использование другого распространённого материала для лазерной резки – фанеры – в качестве основного материала для изготовления деталей было нецелесообразным

ввиду того, что фанера поступает от поставщиков в ненадлежащем качестве, с прогибами, следовательно, данный материал непригоден для создания ответственных деталей устройства.



Рисунок 6.4.3 Детали после печати: рукоятка и ролики.

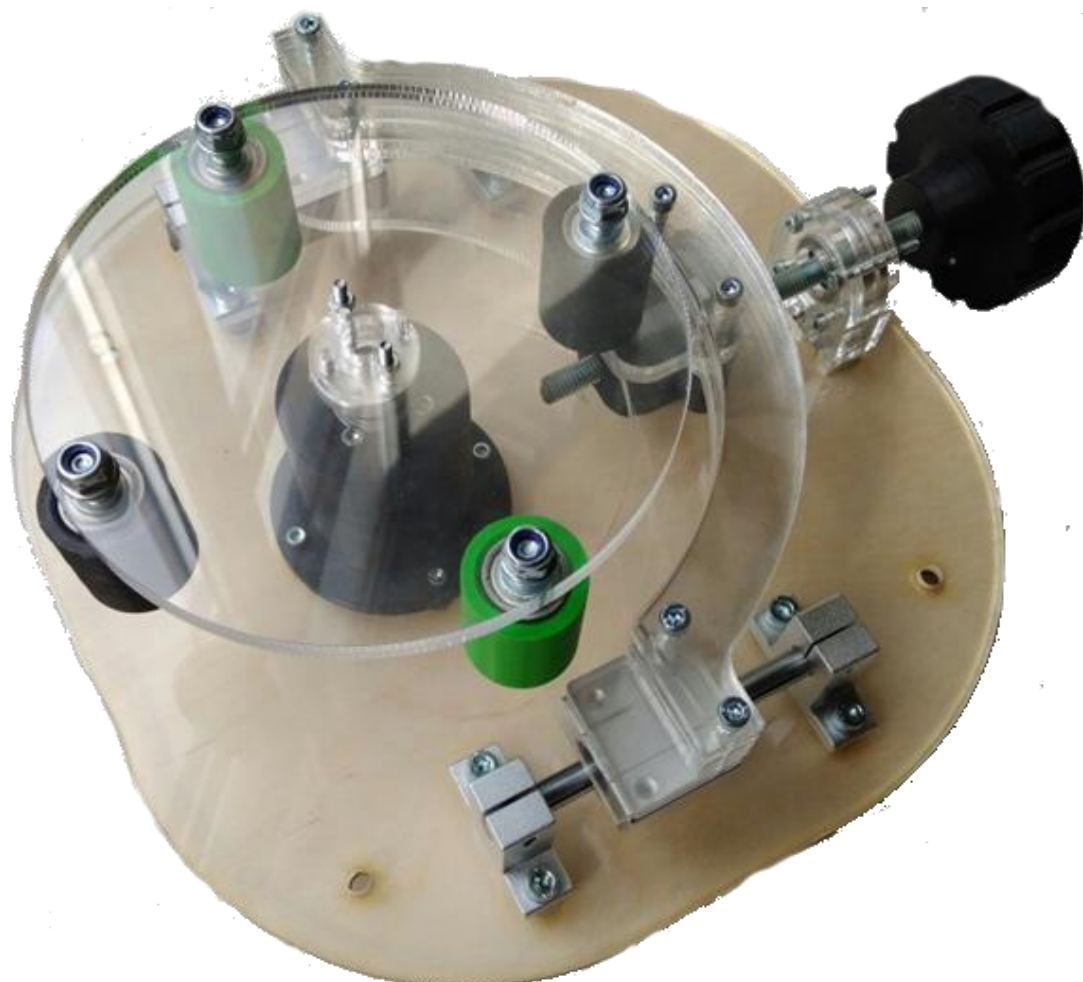


Рисунок 6.4.4 Перистальтический насос в сборке

## **7. РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ**

### **7.1 Правила работы устройства**

Алгоритм работы устройства и программа разрабатывается исходя из следующих правил работы:

- Диаметр трубки по умолчанию – 0.5 дюйма
- Направление вращения двигателя по умолчанию – по часовой стрелке
- Изменение диаметра трубки или реверс направления вращения двигателя возможно при остановленном двигателе
- Остановка, запуск и изменение скорости вращения двигателя производится при одновременном нажатии кнопки «функция» для предотвращения ложного срабатывания
- Изменение скорости вращения двигателя происходит в два этапа: выставлением желаемого значения при помощи потенциометра, одновременным нажатием кнопки «функция» и кнопки «пуск»
- На экран выводится построечно
  - диаметр трубки
  - текущая объёмная скорость перфузии
  - желаемая объёмная скорость перфузии (по потенциометру)
  - направление вращения

### **7.2 Работа с драйвером ТВ6612FNG**

Согласно технической документации драйвера, максимальный рабочий ток драйвера на один канал – 1.2 А (3 А на пиковых значениях, в течение короткого времени). Так как номинальный ток выбранного двигателя составляет 1.65 А, принимается решение о разделении питания двигателя и дублировании управляющих сигналов одновременно на оба канала драйвера.

Управление одним каналом двигателя происходит при помощи четырёх управляющих сигналов: IN1, IN2, Standby и PWM. PWM принимает значение от 0 до 255 и управляет скоростью вращения двигателя от остановки до максимальных оборотов соответственно, а сигналы IN1, IN2, Standby являются логическими и определяют направление вращения двигателя. [10] В таблице 7.2.1 приведены возможные состояния управляющих сигналов.

Таблица 7.2.1 Возможные состояния управляющих сигналов драйвера

IN1	IN2	Standby	Состояние двигателя
0	0	1	Остановка
0	1	1	Вращение против часовой стрелки
1	0	1	Вращение по часовой стрелке
1	1	1	Остановка
Не важно	Не важно	0	Ожидание (остановка)

Рассмотрим схему подключения драйвера (рисунок 7.2.1). Для осуществления дублирования сигнала без использования дополнительных контактов контроллера, будут объединены следующие контакты: AIN1 и BIN1, AIN2 и BIN2, PWMA и PWMB.

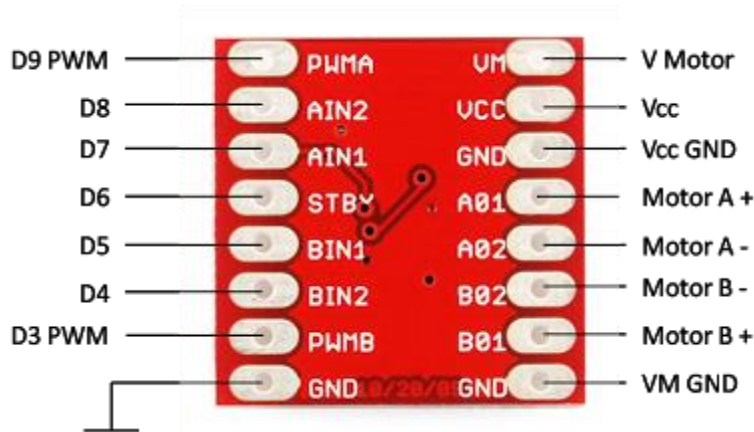


Рисунок 7.2.1 Схема подключения драйвера TB6612FNG

### 7.3 Используемые переменные

- diam – диаметр трубки, тип – число с плавающей запятой, float;
- on – включение вращения двигателя, тип – логический, boolean;
- reverse – реверсный режим, тип – логический, boolean;
- enc – показания энкодера, тип целочисленный, integer;
- req – требуемые показания энкодера, тип целочисленный, integer;
- pos – показания потенциометра, тип целочисленный, integer.

### 7.4 Описание алгоритма и основных процедур

Процедура setup выполняется один раз при включении устройства, после чего начинается бесконечный цикл, во время которого выполняется процедура loop. В ходе процедуры setup выполняется инициализация используемых переменных, назначение режима работы контактов контроллера и вывод стартового текста на экран.

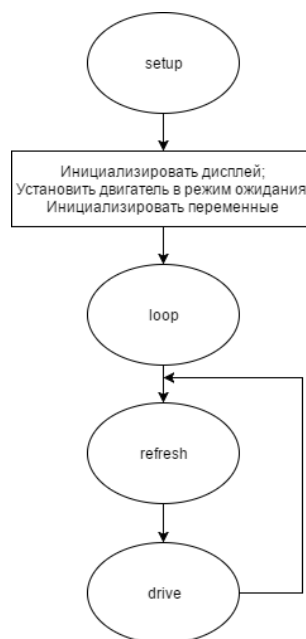


Рисунок 7.4.1 Схема работы управляющей программы

```
void setup()
{
//инициализация дисплея
  lcd.init();
  lcd.init();
  // напечатать приветственное сообщение.
```



```

    lcd.backlight();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Peristaltic pump");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Master degree");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("CDIO project");
    lcd.setCursor(1,3);
    lcd.print("by Miroshnik G.A.");
    delay(1000);
//инициализация пинов для управления двигателем
//вместо 7 используются 4 пина,
//так как каналы дублируют друг друга
    pinMode(PWM,OUTPUT);
    pinMode(IN1,OUTPUT);
    pinMode(IN2,OUTPUT);
    pinMode(STBY,OUTPUT);
//инициализация пинов кнопок и светодиодов
    pinMode(L1,OUTPUT);
    pinMode(L2,OUTPUT);
    pinMode(L3,OUTPUT);
    pinMode(L4,OUTPUT);
    pinMode(L5,OUTPUT);
    pinMode(B1,INPUT_PULLUP);
    pinMode(B2,INPUT_PULLUP);
    pinMode(B3,INPUT_PULLUP);
    pinMode(B4,INPUT_PULLUP);
    pinMode(B5,INPUT_PULLUP);
    pinMode(B6,INPUT_PULLUP);
    pinMode(B7,INPUT_PULLUP);
//устанавливаются значения по умолчанию
    digitalWrite(IN1,HIGH);
    digitalWrite(IN2,LOW);
    digitalWrite(STBY,HIGH);
    diam=12,7;
    on=false;
    reverse=false;
}

```

Процедура чтения данных и обновления дисплея необходима своевременного снятия управляющих сигналов и вывода информации пользователю. В ходе процедуры считывается нажатие кнопок, позиция потенциометра и значение на энкодере двигателя, обновляются значения индикаторных светодиодов и дисплея. Ниже представлен листинг процедуры refresh и её алгоритм (рисунок 7.4.2)

```

void refresh() {
    // сбросить значения для светодиодов
    DigitalWrite(L1, LOW);
    DigitalWrite(L2, LOW);
    DigitalWrite(L3, LOW);
    DigitalWrite(L4, LOW);
    DigitalWrite(L5, LOW);
    //
    if (reverse) {
        DigitalWrite(L4, HIGH);
    };
    if (on) {
        DigitalWrite(L5, HIGH);
    };
    switch (diam)
    { case 0.5 : DigitalWrite(L2, HIGH);
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("Diam 0.5");
      case 1 : DigitalWrite(L1, HIGH);
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("Diam 1");
      case 0.25 : DigitalWrite(L3, HIGH);
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("Diam 0.25");
    }
    enc = AnalogRead(ENCODER);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Current V ENC 1/m");
    pos = AnalogRead(POSITION);
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("Required V POS 1/m");
    if (reverse) {
        lcd.setCursor(0, 3);
        lcd.print("CCW");
    } else {
        lcd.setCursor(0, 3);
        lcd.print("CW");
    }
}
}

```

Процедура управления двигателем необходима для определения необходимости регулирования количества оборотов, отработки команд изменения диаметра трубки и коэффициента, рассчитывающего объёмную скорость перфузии, изменения заданного оператором необходимого количества оборотов в минуту. Ниже приведён листинг процедуры drive, а на рисунке 7.4.3 приведён алгоритм процедуры drive.

```

void drive() {
  if (on)
  {
    if (abs(enc - rec) > 2) {
      pwm = pwm + enc - rec; if (pwm < 255) {
        analogWrite(pwm);
      }
    };
    if (digitalRead(B7) == LOW) {
      if (digitalRead(B10) == LOW) {
        on = FALSE;
        digitalWrite(STBY, HIGH);
        delay(1000);
      };
      if (digitalRead(B9) == LOW) {
        on = TRUE;
        digitalWrite(STBY, HIGH);
        delay (500);
        req = pos;
      };
    }
  } else {
    if (digitalRead(B8) == LOW) {
      IN1 = !IN1;
      IN2 = !IN2;
    };
    if (digitalRead(B9) == LOW) {
      on = TRUE;
      digitalWrite(STBY, HIGH);
      delay (500);
      req = pos;
    };
    if (digitalRead(B4) == LOW) {
      diam = 1;
    };
    if (digitalRead(B5) == LOW) {
      diam = 0.5;
    };
    if (digitalRead(B6) == LOW) {
      diam = 0.25;
    };
  }
}

```

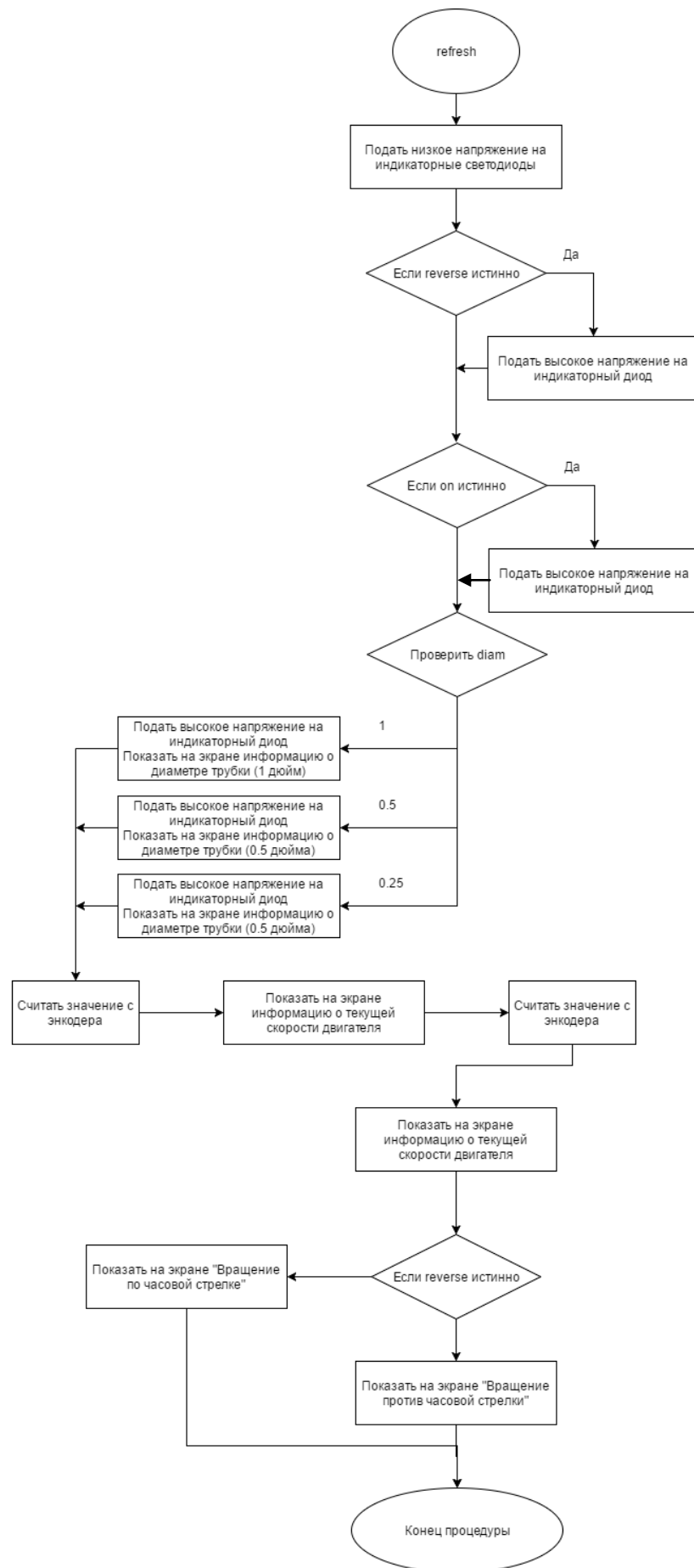


Рисунок 7.4.2 Алгоритм процедуры refresh

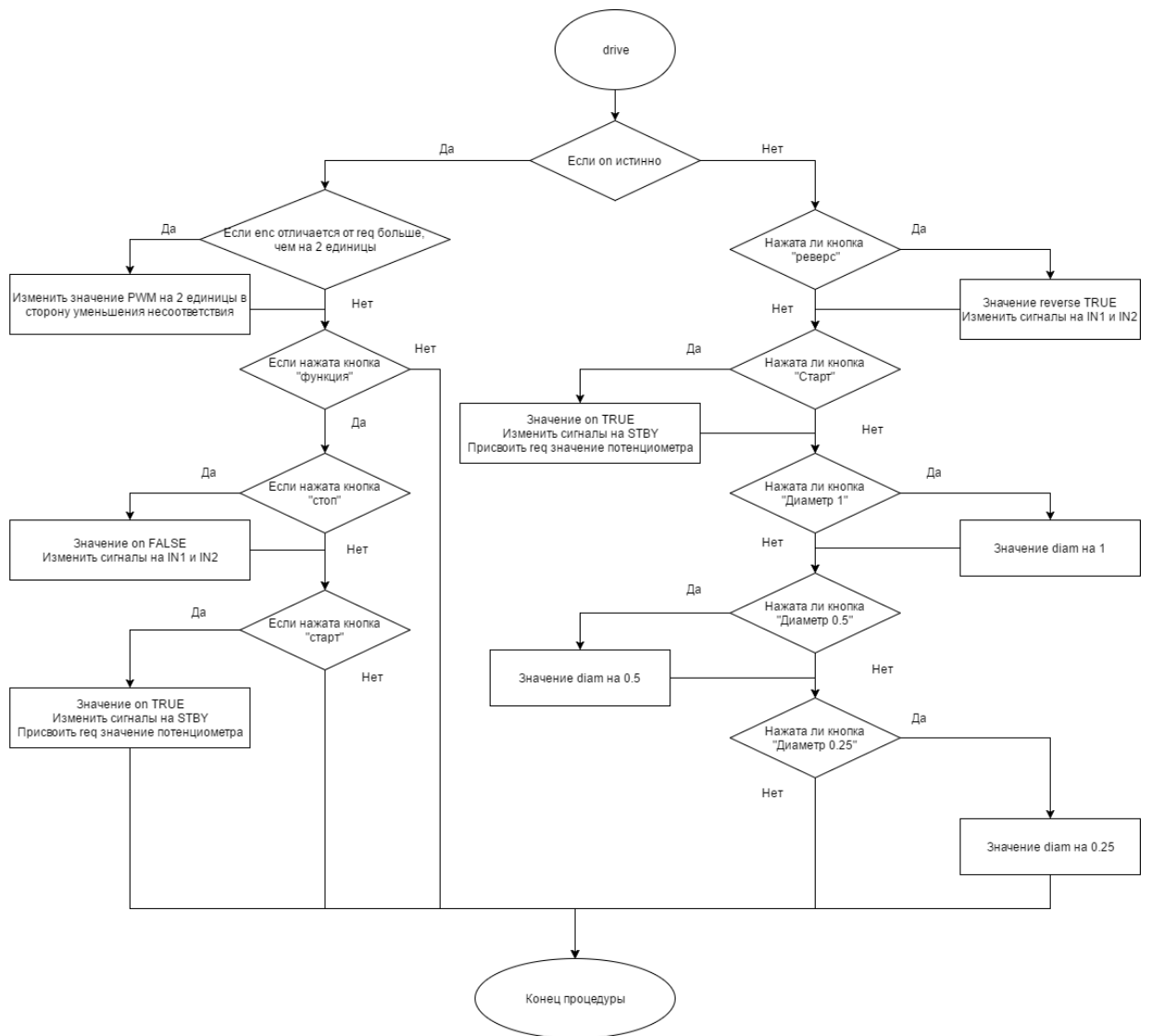


Рисунок 7.4.3 Алгоритм процедуры drive

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был проведён полный цикл работ, связанных с разработкой и изготовлением экспериментальной установки: обзор аналогов; составление технического задания; описание устройства в виде комбинированной схемы; расчёт и математическое моделирование узлов установки; разработка комплекта технической документации, состоящего из 3D-моделей и управляющих программ для станков; изготовление деталей с применением оборудования с числовым программным управлением и сборка устройства; составление алгоритма работы устройства и его реализация на базе подобранных комплектующих.

В рамках выполнения проекта был заключён договор о сотрудничестве с бизнес-инкубатором «Политехнический» (договор №019-64/2016 от 3 ноября 2016 года), получена консультационная поддержка от первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета имени академика И. П. Павлова. Проект прошёл в финал конкурса У.М.Н.И.К фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в декабре 2016 года.

Изготовленная установка будет использована для проведения экспериментов в ПСПбГМУ им. Павлова, конструкторская документация может быть использована для повторного воспроизведения установки и разработки следующих версий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **10 ведущих причин смерти в мире** [Статья] / авт. Всемирная организация здравоохранения. - январь 2017 г.. - <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs310/ru/>.

[2] **Схемы технологических машин** [Книга] / авт. Павлюченко С. В. Попов А. Н., Пуленец Н. В., Тимофеев А. Н.. - Санкт-Петербург : Издательство политехнического университета, 2013.

[3] **ГОСТ 21752-76 Система "человек-машина". Маховики и штурвалы. Общие эргономические требования (с Изменением №1)** [Книга]. - Москва : Издательство стандартов, 1987.

[4] **Передача винт-гайка** [Книга] / авт. Варганов В. О. Аввакумов М. В., Колычев М. В., Гребенникова В. М., Романов В. А.. - Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2015.

[5] **ГОСТ 22613-77 Система "человек-машина". Выключатели и переключатели поворотные. Общие эргономические требования** [Книга]. - Москва : Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1977.

[6] **Инженерный анализ методом конечных элементов.** [Книга] / авт. Алямовский А.А. – Москва : ДМК Пресс, 2004.

[7] **Silicone rubber** [Статья] / авт. AZoM.com // AZoM.com. - 4 04 2017 г.. - <http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=920>.

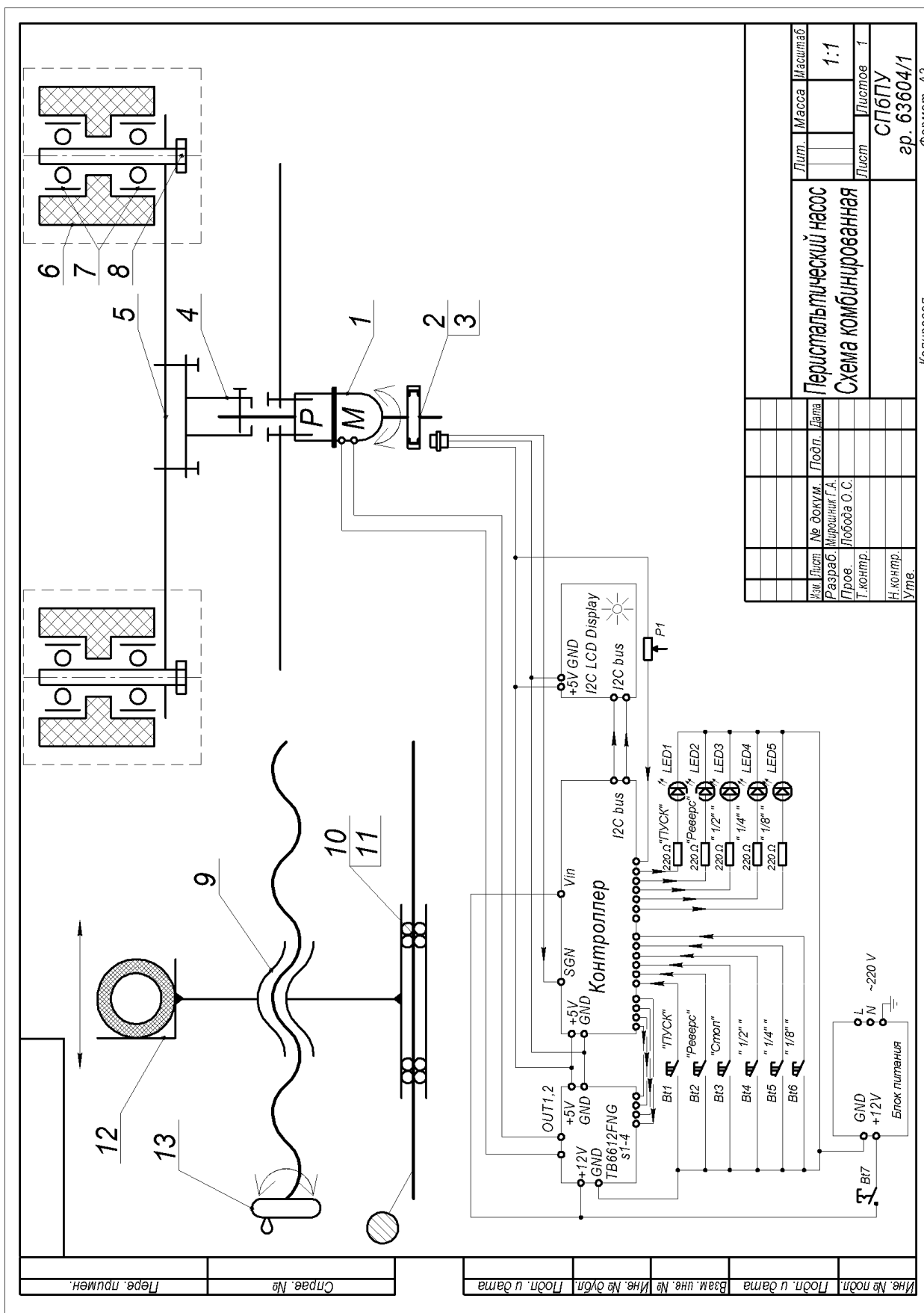
[8] **Mechanical Characterization of Soft Materials: Comparison between Different Experiments on Synthetic Specimens** [Статья] / авт. Марк Холленштейн - Швейцарский государственный институт технологий Цюриха, 2008

[9] **Mooney-Rivlin rubber material approximation** [Статья] // - Jerry Steiger, 2014.

[10] **TB6612FNG** [Техническая документация] / авт. Toshiba. - 2008 г..



# ПРИЛОЖЕНИЕ 1. КОМБИНИРОВАННАЯ СХЕМА



Име. № подл. Подл. и дата  
Взам. инв. №  
Име. № инв. №  
Спрае. №  
Листе. примаен.

Име. № подл. Подл. и дата  
Взам. инв. №  
Име. № инв. №  
Спрае. №  
Листе. примаен.

Име. № подл.	Подл. и дата	Лист	Листов	1
Взам. инв. №		Име. № инв. №		
Спрае. №		Лист	Листов	1
Листе. примаен.		Лист	Листов	1
Перистальтический насос				Масштаб
Схема комбинированная				1:1
Исполн. Мирончик Г.А.				
Проект. Лобода О.С.				
Т. контр.				
Н. контр.				
Ултв.				
СРБТУ				
зр. 63604/1				

Копиреал  
Формат А3

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ЛИСТИНГ ПРОГРАММЫ КОНТРОЛЛЕРА

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);

void setup()
{
  //инициализация дисплея
  lcd.init();
  lcd.init();
  // напечатать приветственное сообщение.
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Peristaltic pump");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Master degree");
  lcd.setCursor(0,2);
  lcd.print("CDIO project");
  lcd.setCursor(1,3);
  lcd.print("by Miroshnik G.A.");
  delay(1000);
  //инициализация пинов для управления двигателем
  //вместо 7 используются 4 пина,
  //так как каналы дублируют друг друга
  pinMode(PWM,OUTPUT);
  pinMode(IN1,OUTPUT);
  pinMode(IN2,OUTPUT);
  pinMode(STBY,OUTPUT);
  //инициализация пинов кнопок и светодиодов
  pinMode(L1,OUTPUT);
  pinMode(L2,OUTPUT);
  pinMode(L3,OUTPUT);
  pinMode(L4,OUTPUT);
  pinMode(L5,OUTPUT);
  pinMode(B1,INPUT_PULLUP);
  pinMode(B2,INPUT_PULLUP);
  pinMode(B3,INPUT_PULLUP);
  pinMode(B4,INPUT_PULLUP);
  pinMode(B5,INPUT_PULLUP);
  pinMode(B6,INPUT_PULLUP);
  pinMode(B7,INPUT_PULLUP);
  //устанавливаются значения по умолчанию
  DigitalWrite(IN1,HIGH);
  DigitalWrite(IN2,LOW);
  DigitalWrite(STBY,HIGH);
  diam=12,7;
  on=false;
  reverse=false;
}
```

```

void refresh() {
    // сбросить значения для светодиодов
    digitalWrite(L1, LOW);
    digitalWrite(L2, LOW);
    digitalWrite(L3, LOW);
    digitalWrite(L4, LOW);
    digitalWrite(L5, LOW);
    //
    if (reverse) {
        digitalWrite(L4, HIGH);
    };
    if (on) {
        digitalWrite(L5, HIGH);
    };
    switch (diam)
    { case 0.5 : digitalWrite(L2, HIGH);
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("Diam 0.5");
      case 1 : digitalWrite(L1, HIGH);
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("Diam 1");
      case 0.25 : digitalWrite(L3, HIGH);
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("Diam 0.25");
    }
    enc = analogRead(ENCODER);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Current V ENC 1/m");
    pos = analogRead(POSITION);
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("Required V POS 1/m");
    if (reverse) {
        lcd.setCursor(0, 3);
        lcd.print("CCW");
    } else {
        lcd.setCursor(0, 3);
        lcd.print("CW");
    }
}

void drive() {
    if (on)
    {
        if (abs(enc - rec) > 2) {
            pwm = pwm + enc - rec; if (pwm < 255) {
                analogWrite(pwm);
            }
        }
    }
}

```

```

    }
};
if (digitalRead(B7) == LOW) {
    if (digitalRead(B10) == LOW) {
        on = FALSE;
        digitalWrite(STBY, HIGH);
        delay(1000);
    };
    if (digitalRead(B9) == LOW) {
        on = TRUE;
        digitalWrite(STBY, HIGH);
        delay (500);
        req = pos;
    };
}
} else {
    if (digitalRead(B8) == LOW) {
        IN1 = !IN1;
        IN2 = !IN2;
    };
    if (digitalRead(B9) == LOW) {
        on = TRUE;
        digitalWrite(STBY, HIGH);
        delay (500);
        req = pos;
    };
    if (digitalRead(B4) == LOW) {
        diam = 1;
    };
    if (digitalRead(B5) == LOW) {
        diam = 0.5;
    };
    if (digitalRead(B6) == LOW) {
        diam = 0.25;
    };
}
}

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:
    refresh();
    drive();
}

```

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПИСЬМО ПОДДЕРЖКИ ОТ ПСПБГМУ

Письмо поддержки научной работы на тему:  
«Разработка системы транспортировки эксплантированных органов».

Исполнитель: Мирошник Глеб Андреевич

Научный руководитель – к. ф-м. н. Лобода Ольга Сергеевна

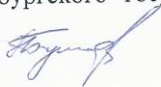
Сотрудники НИИ хирургии и неотложной медицины, совместно с сотрудниками НИИ детской онкологии, гематологии и трансплантологии им. Р.М. Горбачевой ПСПБГМУ им. акад. И. П. Павлова изучили аннотацию научной работы Мирошника Глеба Андреевича. Работа посвящена разработке системы, основой которой является насос для перфузии органа и модуль магнитной элиминации провоспалительных агентов (клетки иммунной системы и биомолекулы), магистрали, вспомогательные модули, а также набор специфических антител с магнитными частицами (антитела к провоспалительным биомолекулам и к рецепторам клеток иммунной системы, ответственным за воспаление). Модуль магнитной элиминации противовоспалительных агентов обеспечит большую сохранность эксплантированных органов и является ключевым преимуществом по сравнению с другими системами перфузии эксплантированных органов. Области применения: трансплантация сердца, трансплантация легких. Подтверждаем актуальность научной работы, высокую потребность в подобных устройствах для научных и прикладных исследований в клинической трансплантологии. Планируем оказывать всю необходимую консультационную поддержку, необходимую для создания системы транспортировки эксплантированных органов. Выражаем готовность при наличии системы транспортировки эксплантированных органов осуществить экспериментальные исследования на животных и эксплантированных органах, а также, после получения предварительных данных пилотных исследований, подать заявку на грант для проведения более масштабных исследований. В случае получения успешных результатов НИОКР, система транспортировки эксплантированных органов может найти коммерческое применение.

**Консультанты:**



проф. А. С. Немков, научный руководитель кардиохирургического центра НИИ хирургии и неотложной медицины Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И. П. Павлова

Н. С. Буненков, НИИ детской онкологии, гематологии и трансплантологии Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И. П. Павлова



В.В. Комок, НИИ хирургии и неотложной медицины Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И. П. Павлова

