

**Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого**

**Коткас Любовь Александровна**

**Методика расчета позиционного пневматического привода мускульного  
типа для подъемно-транспортных манипуляторов**

Направление подготовки: 15.06.01 «Машиностроение»

---

*Код и наименование*

Направленность: 15.06.01\_12 «Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты»

---

*Код и наименование*

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Санкт Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Высшей школе «Энергетическое машиностроение», секторе «Гидромашины»

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор  
**Жарковский Александр Аркадьевич**

**Официальный рецензент:**

кандидат технических наук  
**Носков Евгений Игоревич**  
главный специалист службы сервиса и ремонта  
ООО «ПК «РОСНА Инжиниринг»

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** На сегодняшний день широкое применение пневмопривода на пневмоцилиндрах в промышленных манипуляторах обусловлено рядом его достоинств по сравнению с другими видами приводов. Пневмопривод можно охарактеризовать большим быстродействием, высокой удельной мощностью, простотой конструкции, возможностью работать в загрязненных и экстремальных средах. Однако для пневмоцилиндров характерна неравномерность движения на малых скоростях из-за трения, возникающего в уплотнениях штока, сложность регулирования скорости, большой вес и габаритные размеры. Вышеуказанные недостатки поможет устранить пневмопривод на пневмомускулах.

Пневмомускул является линейным двигателем одностороннего действия. Активной частью пневмомускула является резиновая цилиндрическая оболочка, армированная нерастяжимым кордом с кевларовыми нитями, уложенными под определенным углом. При подаче давления в полость оболочки пневмомускула он расширяется в поперечном направлении и сокращается в продольном, развивая при этом значительное усилие, которое может достигать 6000 Н.

Использование пневмомускула в качестве пневмопривода позволяет избежать недостатков, связанных с применением пневмоцилиндра. Благодаря конструкции, у него отсутствует неравномерность движения на малых скоростях, он обладает высокой удельной мощностью (масса пневмомускула меньше массы пневмоцилиндра в 5 – 10 раз при тех же развиваемых усилиях). При этом пневмомускул обладает теми же достоинствами, что и пневмоцилиндр: низкой стоимостью, возможностью применения в запыленных, влажных, взрывоопасных и радиационных средах, высоким ресурсом (до 5 млн циклов).

Благодаря описанным свойствам пневмомускула, промышленные пневматические манипуляторы, использующие в качестве привода пневмомускул, имеют облегченную конструкцию, являются безопасными для окружающей среды и человека и подходят для работы в ограниченных пространствах.

Главными недостатками при применении пневмомускула в качестве привода промышленного манипулятора являются свойства материала оболочки. Колебательный характер движения, чувствительность к переменной нагрузке, нелинейность статической характеристики, наличие гистерезиса усложняет точное моделирование характеристик пневмомускула и, как следствие, создание автоматической системы управления, удовлетворяющей требованиям быстродействия, точности и устойчивости. На сегодняшний день множество работ посвящено разработке таких систем с применением современных методов управления. Недостатком таких систем является высокая стоимость реализации таких систем управления, поскольку они требуют использования дорогой аппаратуры, а также предполагают сложное математическое моделирование. Вторым недостатком является введение дополнительных тормозных устройств для работы в условиях переменной нагрузки, что усложняет конструкцию манипулятора и не всегда является целесообразным.

Большое количество работ в промышленности отводится на погрузочно-разгрузочные и вспомогательные операции. Такие операции применяются при обслуживании машиностроительных производств, конвейерных линий, зон хранения грузов. В мелкосерийном производстве для выполнения таких операций обычно применяют манипуляторы не с автоматическим, а с ручным управлением. Существуют манипуляторы для подъемно-транспортных работ с ручным управлением, использующие в качестве привода пневмомускул, разработанные компанией «Рекорд-инжиниринг». Для управления перемещением груза в пространстве используются рукоятки с пневматическими распределителями.

Предметом научного исследования стала разработка оригинальной инженерной методики расчета позиционного привода мускульного типа, а также - универсальной методики ориентирования груза промышленным манипулятором мускульного типа не только с помощью пневмоаппаратуры, но также и с помощью непосредственного усилия оператора.

**Целью работы** является разработка методики расчета позиционного промышленного пневмопривода мускульного типа для подъемно-транспортных манипуляторов.

**Задачи исследования.**

1. Разработка уточненной математической модели усилия, развиваемого пневмомускулом.
2. Разработка динамической модели пневматического мускула для подъема и опускания груза.
3. Синтез схем позиционного привода мускульного типа для подъемно-транспортных манипуляторов.
4. Исследование различных режимов работы позиционного привода мускульного типа и промышленного манипулятора.
5. Разработка универсальной методики ориентирования груза.
6. Теоретическое и экспериментальное исследование статических и динамических характеристик привода мускульного типа для верификации разработанных моделей и методик.

**Научная новизна.**

1. Универсальная математическая модель для расчета усилия развиваемого пневмомускулом фирмы FESTO, отражающая структуру и принцип действия исследуемого двигателя, отличающаяся от предыдущих минимумом корректирующих коэффициентов.
2. Динамическая модель подъема и опускания груза, учитывающая деформацию оболочки пневмомускула и обладающая минимумом корректирующих коэффициентов.
3. Динамические модели пневматического мускула в виде трубопровода, учитывающие волновые процессы в рабочей среде при наполнении и опустошении оболочки, с учетом и без учета динамики подводящего трубопровода, что является актуальным при использовании пневмомускула с длиной оболочки превышающей ее диаметр в десятки раз.
4. Динамические модели пневматического мускула в виде камеры с учетом и без учета динамики подводящего трубопровода.
5. Универсальная методика позиционирования промышленного манипулятора мускульного типа с помощью пневмоаппаратуры и ручного ориентирования усилием оператора.
6. Теоретические зависимости для разных режимов позиционирования промышленного манипулятора в зависимости от конструктивных параметров двигателя.

**Теоретическая и практическая ценность** состоит в синтезе принципиальных схем промышленного манипулятора с приводом мускульного типа с ручным управлением, в том числе схем, не требующих дополнительной настройки при изменении веса груза, разработке инженерной методики расчета промышленного манипулятора с приводом мускульного типа, в исследовании аварийных режимов работы пневматического манипулятора с приводом мускульного типа, получении экспериментальных данных по статическим и динамическим характеристикам пневматического мускула, а также по ориентированию груза оператором вручную, в разработке методики выбора пневматического мускула для обеспечения требуемого диапазона позиционирования выходного звена.

**Методы исследования.**

1. Теоретические исследования характеристик привода на базе пневмомускула и пневматического манипулятора с приводом мускульного типа на базе методов математического моделирования пневматического привода с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений. В данной работе применен метод верификации полученных результатов теоретического моделирования на основе экспериментальных данных. Экспериментальные данные были получены на лабораторном стенде. Численное моделирование выполнялось с помощью MathCad методом Эйлера.
2. Применялось комплексное решение научно-технической задачи с помощью таких методов как анализ и синтез полученных знаний для обоснования и разработки промышленного манипулятора с приводом мускульного типа.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на:

1. Неделе науки СПбПУ «Материалы научной конференции с международным участием 13-19 ноября 2017 года», СПбПУ 2017;
2. МНТК «Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития 7-8 июня 2018 года», СПбПУ, 2018;
3. 5-я ВНТК «Гидравлика 27 ноября 2018 года», МГТУ, 2018;
4. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 13-14 December 2018, 6-я ВНТК «Гидравлика 26 ноября 2019 года», МГТУ, 2019;
5. 23-я МНТК «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика», МЭИ, 4 декабря 2019 года, МЭИ, 2019;
6. Неделя науки СПбПУ «Материалы научной конференции с международным участием 18-23 ноября 2019 года», СПбПУ 2019.
7. 5-я МНТК «Динамика и виброакустика машин» (ДВМ2020) 16-18 сентября 2020 года.

**Публикации.** Основные результаты исследований опубликованы в 12 статьях, из них 3 в журналах, входящих в список научных изданий, рекомендованных ВАК.

**Представление научного доклада: основные положения.**

1. Математическая модель для определения статических характеристик пневмомускула.
2. Математическая модель для динамических характеристик привода мускульного типа для подъема/спуска груза.
3. Математические модели пневматического мускула в виде трубопровода для динамических характеристик с учетом и без учета динамики подводящего трубопровода.
4. Математические модели пневматического мускула в виде камеры с учетом и без учета динамики подводящего трубопровода.
5. Универсальная методика позиционирования сбалансированного промышленного манипулятора с приводом мускульного типа.
6. Исследование режимов работы привода мускульного типа и сбалансированного манипулятора с приводом мускульного типа.
7. Теоретические зависимости для разных режимов позиционирования промышленного манипулятора в зависимости от конструктивных параметров двигателя.
8. Верификация полученной модели и методики путем экспериментальных исследований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

На сегодняшний день пневматические манипуляторы широко применяются в промышленности для транспортных и грузоподъемных работ. В основном пневматические манипуляторы на пневмоцилиндрах применяются в тех областях, где требуется грузоподъемность до 40 кг. Важными требованиями, предъявляемыми к промышленным манипуляторам, являются: компактность конструкции, низкая стоимость, надежность включения, работы и выключения, малая масса и габаритные размеры для заданной грузоподъемности, стабильное нарастание скорости при подъеме груза.

Такие недостатки пневматического цилиндра как неравномерность движения на малых скоростях вследствие влияния сухого трения, сложность реализации плавного торможения, а также большие вес и габаритные размеры делают его применение в некоторых случаях нецелесообразным. В последнее время появились исследования по применению в промышленных устройствах двигателя оболочкового типа – пневмомускула.

**Объектом исследования** данной работы является позиционный промышленный манипулятор с пневматическим мускулом в качестве привода. **Задачи**, которые решались в данной работе: анализ существующих моделей пневматического мускула, разработка уточненной математической модели для описания его статических характеристик, создание динамической модели привода и манипулятора, анализ существующих конструкций манипуляторов мускульного типа и синтез новой пневматической схемы, а также экспериментальная проверка результатов моделирования.

### 1. Устройство и принцип действия пневматического мускула

Пневмомускул является линейным двигателем одностороннего действия. Существует много видов пневмомускулов, однако пневмомускулы фирмы FESTO обладают самым выгодным для промышленных целей соотношением развиваемого усилия, хода и диапазоном рабочих давлений. На рис. 1 представлен принцип работы пневматического мускула.

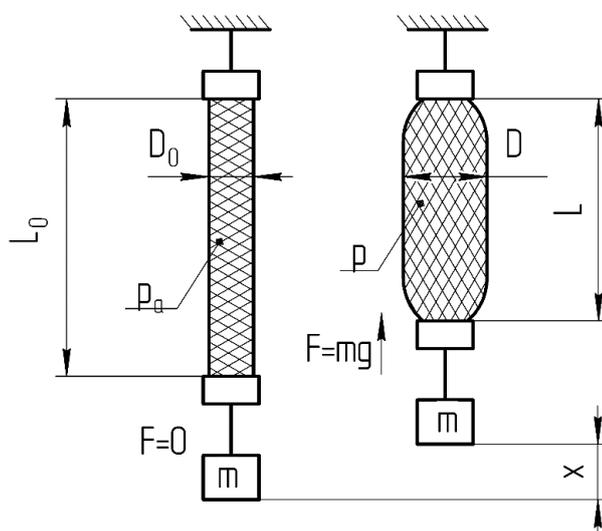


Рисунок 1 – Общий вид пневматического мускула FESTO

Активной частью пневмомускула FESTO является цилиндрическая оболочка из эластомера, армированная двумя слоями кевларовых нитей, уложенных относительно друг друга под определенным углом и образующих трехмерную жесткую сетку. При подаче давления в полость оболочки пневмомускула он расширяется в поперечном направлении, т. е. его диаметр  $D_0$  увеличивается до значения  $D$ , и сокращается в продольном, т. е. его длина  $L_0$  уменьшается до значения  $L$ . Таким образом он развивает некоторое усилие  $F$  и поднимает груз массой  $m$  на некоторое расстояние  $x$ .

## 2. Постановка задачи и разработка модели для статических характеристик пневматического мускула.

Анализ существующих математических моделей для статических характеристик пневматического мускула показал, что так называемые геометрические модели показывают низкую сходимость с экспериментальными данными пневматических мускулов FESTO, а также включают в себя не все конструктивные параметры пневматического мускула, а эмпирические модели не являются универсальными и могут содержать до 21 корректирующего коэффициента.

В связи с этим, было принято решение о разработке уточненной математической модели для определения усилия пневматического мускула FESTO и синтезе новой динамической модели.

При геометрической параметризации пневмомускула использовались следующие допущения:

- не учитывается толщина стенки пневмомускула;
- нити корда принимаются нерастяжимыми;
- не учитывается явление гистерезиса, то есть потери давления на растяжение оболочки.

Как и в моделях, приведенных в работах других авторов, сетка пневмомускула рассматривалась как набор сегментов-пантографов. На рис. 2 представлена расчетная схема сегмента сетки размером  $r \times l$  и углом между нитями  $2\alpha_0$ . Соответственно угол укладки сетки корда будет равен  $\alpha$ .

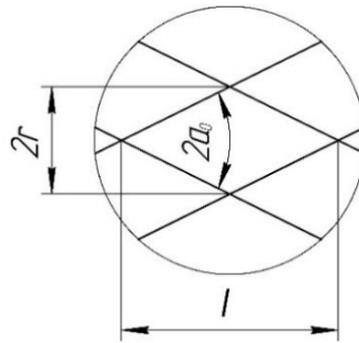


Рисунок 2 – Сегмент сетки пневматического мускула

Новизна состоит в том, что в новой модели жесткость оболочки была учтена через рассмотрение сил упругой деформации, возникающих в результате растяжения и сжатия ячейки (рис. 3, а), также было рассмотрено изменение угла сетки и диаметра оболочки после подачи давления в оболочку пневмомускула (рис. 3, б).

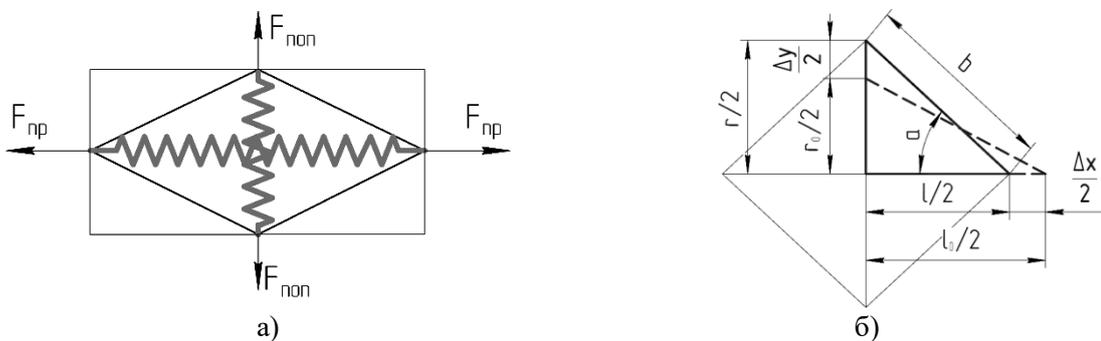


Рисунок 3 – Расчетные схемы сегмента пневмомускула: а) сегмент, представленный в виде пружин, б) геометрические размеры сегмента после подачи давления

Также была произведена адаптация полученной модели к экспериментальным данным, приведенным в каталоге FESTO введением корректирующих коэффициентов, как в работах других авторов. Полученная модель, описывающая статические характеристики пневматического мускула, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 T = \pi D_0 \frac{\frac{\Delta p D_0 \left(1 - \frac{x}{L_0}\right)^2}{2} - \frac{c(\Delta p) \left[ \left(1 - \frac{x}{L_0}\right) \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha_0 \right]}{\operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha}}{\operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha} \\
 -\pi D_0 c(\Delta p) \frac{x}{L_0} - \frac{\pi D_0^2 \Delta p}{4}, \\
 \Delta p = p_M - p_A, \\
 \alpha = \arccos \left[ \left(1 - \frac{x}{L_0}\right) \cos \alpha_0 \right], \\
 c(\Delta p) = r \cdot \Delta p + q.
 \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $T$  – усилие, развиваемое пневмомускулом,  $D_0$  – диаметр оболочки пневмомускула до подачи давления,  $\Delta p$  – давление в оболочке пневмомускула,  $p_M$  – давление в магистральной линии,  $p_A$  – атмосферное давление,  $x$  – перемещение пневмомускула,  $L_0$  – длина оболочки до подачи давления,  $c(\Delta p)$  – жесткость пневмомускула,  $r, q$  – корректировочные коэффициенты,  $\alpha_0$  – угол укладки сетки корда до подачи давления,  $\alpha$  – угол укладки сетки корда после подачи давления.

Сравнение результатов моделирования по полученной модели с экспериментальными данными, представленными в каталоге FESTO, приведены на рис. 4, из которого видно, что сходимость расчета по разработанной модели с каталожными данными лежит в пределах 10 %. Также было проведено сравнение для трех остальных диаметров оболочки пневмомускулов FESTO,  $D_0 = 0,005$  м,  $D_0 = 0,02$  м,  $D_0 = 0,04$  м и были получены такие же результаты.

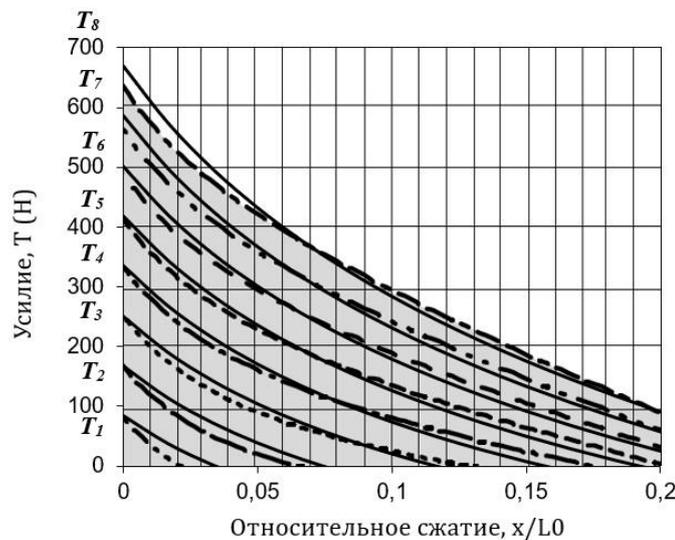


Рисунок 4 – Сравнение результатов расчета по модели (1) (штриховые линии) с данными каталога FESTO (сплошные линии) для пневмомускула DMSP-10:  $T_1$  при  $p = 0,1$  МПа;  $T_2$  при  $p = 0,2$  МПа;  $T_3$  при  $p = 0,3$  МПа;  $T_4$  при  $p = 0,4$  МПа;  $T_5$  при  $p = 0,5$  МПа;  $T_6$  при  $p = 0,6$  МПа

Разработанная модель для статических усилий пневматического мускула имеет следующие преимущества перед геометрическими моделями других авторов:

- учитывает изменение угла укладки корда и диаметра оболочки;
- показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными FESTO (расхождение находится в пределах 10 %)

По сравнению с эмпирическими моделями разработанная модель имеет следующие преимущества: является универсальной для всего ряда пневмомускулов FESTO, содержит всего три эмпирических коэффициента.

### **3. Разработка модели для исследования динамических характеристик пневматического мускула**

Динамические модели, представленные в работах других авторов, также имеют недостатки: недостаточно точно описывают процессы наполнения оболочки пневмомускула сжатым газом, не учитывают изменение таких геометрических параметров как угол укладки сетки корда и диаметр оболочки, не обладают удобством для инженерных расчетов.

При синтезе динамической модели были составлены уравнения движения пневмомускула и изменения давления в оболочке при наполнении/опустошении.

В соответствии с моделью Фойгта и Кельвина пневмомускул был представлен как система, состоящей из двух параллельных элементов – элемента пружины, которая описывает усилие, развиваемое пневмомускулом и учитывает его жесткость как упругого тела, и элемента демпфера, который описывает силу вязкого демпфирования, отражая свойства пневмомускула как тела, обладающего вязкими свойствами. Уравнение движения будет выглядеть следующим образом:

$$mx'' = T - mg - hx', \quad (2)$$

где  $T$  – усилие, развиваемое пневмомускулом,  $m$  – масса груза,  $mg$  – вес груза,  $h$  – коэффициент вязкого демпфирования,  $hx'$  – сила вязкого демпфирования.

Значение коэффициента вязкого демпфирования было взято из экспериментальных данных, полученных в работе, посвященной исследованию свойств пневмомускула.<sup>1</sup>

Как было показано в обзоре, процесс в трубопроводах рядом авторов принимался адиабатическим и использовался обобщенный вид модели Сен-Венана Ванцеля. Однако в работе Погорелова В.И. показано, что в общем случае нельзя рассматривать процессы течения газа в трубопроводе, как адиабатические. Теоретические и экспериментальные данные показывают, что процесс течения газа близок к изотермическому, то есть к протекающему при постоянной температуре.

Уравнения изменения давления в оболочке, представленной в данной работе, отличается от уравнений, представленных в других работах, тем, что процесс течения был принят изотермическим, что соответствует действительности и значительно упрощает модель. Динамическая модель пневматического мускула для подъема и опускания груза записывается в следующем виде:

---

<sup>1</sup> Serres J.L. Dynamic characterization of a pneumatic muscle actuator and its application to a resistive training device. PhD.D. Thesis. Wright State University, 2008. P.201.

$$\begin{cases}
mx'' = T - mg - hx', \\
T = \pi D_0 \frac{(p - p_A) D_0 \left(1 - \frac{x}{L_0}\right)^2}{2} - \frac{c(p) \left[ \left(1 - \frac{x}{L_0}\right) \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha_0 \right]}{\operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha} - \pi D_0 c(p) \frac{x}{L_0} - \frac{\pi D_0^2 (p - p_A)}{4}, \\
p' = a \left[ \frac{k f_H \sqrt{RT_M}}{\frac{\pi D^2}{4} (L_0 - x) \sqrt{\zeta_H}} \sqrt{p_M^2 - p^2} \right] + (a - 1) \left[ \frac{k f_B \sqrt{RT_M}}{\frac{\pi D^2}{4} (L_0 - x) \sqrt{\zeta_B}} \left(\frac{p}{p_M}\right)^{k-1} \sqrt{p^2 - p_A^2} \right] - \\
- \frac{k \pi D p}{\frac{\pi D^2}{2} (L_0 - x)} \left[ (L_0 - x) D' - \frac{D}{2} x' \right], \\
\alpha = \arccos \left[ \left(1 - \frac{x}{L_0}\right) \cos(\alpha_0) \right], \\
c(p) = rp + q,
\end{cases} \quad (3)$$

где  $m$  – масса груза,  $T$  – усилие, развиваемое пневмомускулом,  $mg$  – вес груза,  $h$  – коэффициент вязкого демпфирования,  $hx'$  – сила вязкого демпфирования,  $p$  – текущее значение давления в оболочке пневмомускула.  $p_M$  – давление в магистральной линии,  $p_A$  – атмосферное давление,  $D_0$  – диаметр оболочки пневмомускула до подачи давления,  $x$  – перемещение пневмомускула,  $L_0$  – длина оболочки до подачи давления,  $c(p)$  – жесткость пневмомускула, где  $r$ ,  $q$  – корректировочные коэффициенты,  $\alpha_0$  – угол укладки сетки корда до подачи давления,  $\alpha$  – угол укладки сетки корда после подачи давления,  $a$  – коэффициент, определяющий процесс, происходящий в оболочке,  $k$  – показатель адиабаты,  $f_H$  – площадь поперечного сечения подводящей линии трубопровода,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T_M$  – температура газа в магистрали,  $\zeta_H$  – сопротивление подводящей линии трубопровода,  $f_B$  – площадь поперечного сечения линии выхлопа трубопровода,  $\zeta_B$  – сопротивление линии выхлопа трубопровода.

Результаты моделирования представлены на рис. 5.

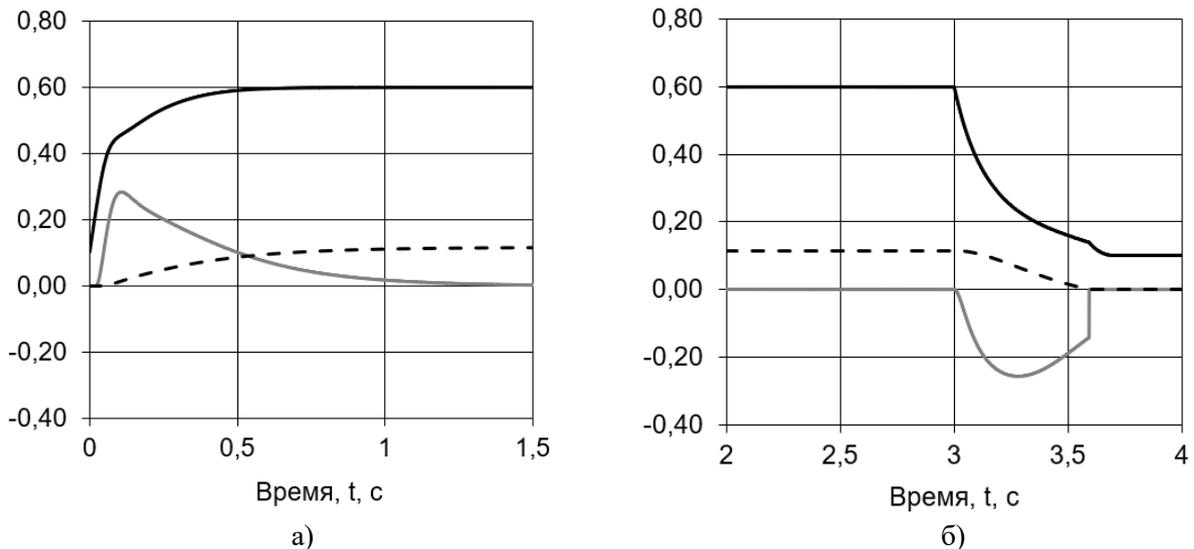


Рисунок 5 – Динамические характеристики пневмомускула DMSP-10 черная сплошная кривая – давление, МПа, серая сплошная кривая – скорость, м/с, штриховая кривая – перемещение, м: а) для процесса наполнения пневмомускула, б) для процесса опустошения пневмомускула.

Разработанная математическая модель пневматического мускула обладает следующими преимуществами по сравнению с другими моделями:

– учитывает структуру оболочки пневматического мускула и изменение таких ее конструктивных параметров как угол укладки корда  $\alpha$  и диаметр оболочки  $D$ ;

- является универсальной для всего размерного ряда пневмомускулов FESTO;
- содержит меньшее количество коэффициентов по сравнению с моделями других авторов;
- обладает удобством для инженерных расчетов.

#### 4. Математическая модель пневматического мускула в виде камеры

Математическую модель (3) пневматического мускула можно значительно упростить если представить его в виде камеры и не учитывать деформацию геометрических параметров оболочки.

Расчетная схема представлена на рис. 6.

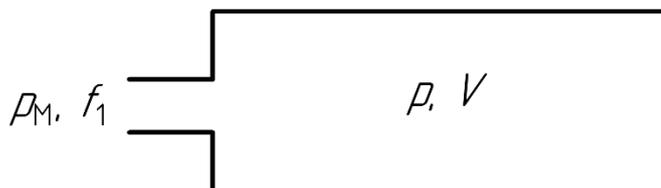


Рисунок 6 – Расчетная схема пневмомускула в виде камеры

При изотермическом течении на входе уравнение изменения давления в камере будет иметь вид:

$$p' = \frac{kf_1\sqrt{RT_M}}{\frac{\pi D_0^2}{4}(L_0 - x)\sqrt{\zeta_1}} \sqrt{p_M^2 - p^2}, \quad (4)$$

где  $k$  – показатель адиабаты,  $f_1$  – площадь поперечного сечения подводящей линии трубопровода,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T_M$  – температура газа в магистрали,  $\zeta_1$  – коэффициент сопротивления пневмоаппаратуры на входе,  $p_M$  – давление магистрали,  $p$  – текущее значение давления в оболочке пневмомускула,  $D_0$  – начальный диаметр пневмомускула,  $L_0$  – начальная длина оболочки пневмомускула.

#### 5. Математическая модель пневматического мускула в виде трубопровода

Также в работе была решена задача, в которой пневматический мускул рассматривался как трубопровод с учетом волновых процессов, происходящих в оболочке. При этом учитывались такие процессы как процесс разгона массы внутри оболочки, процесс изменения величины самой массы газа, процесс распространения волны давления.

Актуальность этой задачи возрастает при расчете пневматического мускула в составе следящего или позиционного привода.

В основном модели длинных пневматических линий либо являются сложными и требуют много времени и вычислительных ресурсов, либо справедливы для малых возмущений. Нами для решения динамической задачи для пневмомускула в виде длинного трубопровода был использован подход, предложенный А.С. Донским.<sup>2</sup> Особенностью данного подхода является то, что он учитывает интегральное проявление процессов на концах линии, что дает возможность описать процессы обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Разработанный подход был применен в рамках данного исследования при рассмотрении пневмомускула в качестве трубопровода.

<sup>2</sup> Донской А.С. Моделирование газодинамических процессов в пневмоприводах. Монография. – СПб.: 2019. – 246 с. <http://elib.spbstu.ru/dl/2/s19-86.pdf>

В нашем случае расчетная схема оболочки пневматического мускула в виде трубопровода представлена на рис. 6.

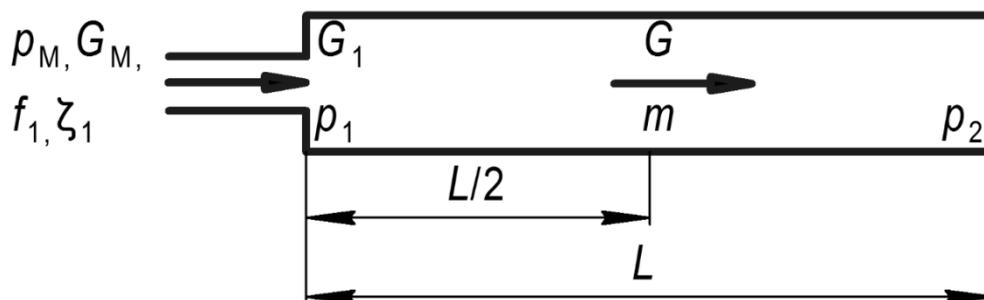


Рисунок 7 – Расчетная схема оболочки пневматического мускула в виде трубопровода

Движение всей массы газа  $m$ , заключенного в данный момент времени внутри пневмомускула (далее ПМ), происходит под действием перепада давлений на концах ПМ (внутри за входом,  $p_1$  и на заглушенном конце,  $p_2$ ).

Средний расход газа  $G$  и расход газа на входе в ПМ  $G_1$  изменяются в переходном процессе. При составлении математической модели была принята следующая гипотеза: изменение давления на концах трубопровода определяется разностью между средним по длине расходом  $G$  и расходом на входе  $G_1$  и величиной объема, равного половине объема трубопровода. Поэтому за счет разности расходов газа на входе по отношению к среднему расходу происходит изменение давления на входе (внутри ПМ), а за счет изменения среднего расхода происходит изменение давления на конце ПМ.

Давление на конце ПМ остается постоянным и равным его начальному значению  $p_{20}$  с момента подачи давления на входе в течение времени распространения волны давления по ПМ, т.е. для  $t < L_0/c$ .

Через время  $t = L_0/c$  волна давления достигает конца ПМ. В результате давление на конце трубопровода изменяется скачкообразно от начального значения  $p_{20}$  до некоторой величины  $p_2$ , после чего происходит дальнейшее непрерывное изменение давления  $p_2$ .

При описании процесса изменения давлений газа в ПМ на его концах необходимо составить следующие уравнения:

- уравнение движения газа в полости ПМ для учета разгона массы;
- уравнения среднего расхода  $G$  и расхода у входа в ПМ  $G_1$  для учета процесса изменения массы газа в полости ПМ.

Время распространения волны давления в начале переходного процесса для учета задержки пневматического сигнала на конце ПМ по сравнению с моментом времени изменения давления на входе будем определять по формуле:

$$t = \frac{L_0}{c},$$

где  $L_0$  – начальная длина пневмомускула.

Модель, учитывающая волновые процессы в оболочке пневмомускула без учета подводящего трубопровода, будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 v' = \frac{\pi D_0^2}{4m} (p_1 - p_2^* - p_{TP}), \\
 m' = \frac{f_1}{\sqrt{\zeta_1 RT_M}} \sqrt{(p_M^2 - p_1^2) \Phi(p_M - p_1)} - \frac{f_1}{\sqrt{\zeta_1 RT_M}} \left( \frac{p_1}{p_M} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{(p_1^2 - p_M^2) \Phi(p_1 - p_M)}, \\
 p_2^* = \begin{cases} p_{20}; & t < L_0 / c, \\ p_2; & t \geq L_0 / c, \end{cases} \\
 p_1' = \frac{2RT}{V_0} \left( m' - \frac{m}{L_0} v \right), \\
 p_2' = \frac{2RT}{V_0 L_0} m v, \\
 p_{TP} = \lambda \frac{L_0}{D_0} \frac{m v^2}{2V_0} \text{sign}(v), \\
 V_0 = \frac{\pi D_0^2}{4} (L_0 - x),
 \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $v$  – средняя скорость газа,  $m$  – текущее значение массы газа в пневматическом мускуле,  $k$  – показатель адиабаты,  $p_1$  – давление сразу за входом в пневмомускул,  $p_2^*$  – давление, характеризующее динамическое сжатие газа на конце трубопровода,  $p_{TP}$  – потери давления на трение внутри пневматического мускула,  $p_2$  – давление во второй половине пневматического мускула,  $f_1$  – площадь поперечного сечения подводящей линии трубопровода,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T_M$  – температура газа в магистрали,  $\zeta_1$  – коэффициент сопротивления пневмоаппаратуры на входе,  $p_M$  – давление магистрали,  $p_{20}$  – начальное давление на конце трубопровода,  $t$  – время распространения волны давления в начале переходного процесса,  $c$  – скорость звука,  $\lambda$  – коэффициент трения воздуха,  $V_0$  – начальный объем пневмомускула,  $L_0$  – начальная длина пневмомускула,  $D_0$  – начальный диаметр пневмомускула.

Результаты моделирования по моделям (4) и (5) для случая полностью открытого входа при скачкообразном изменении давления представлены на рис. 8.

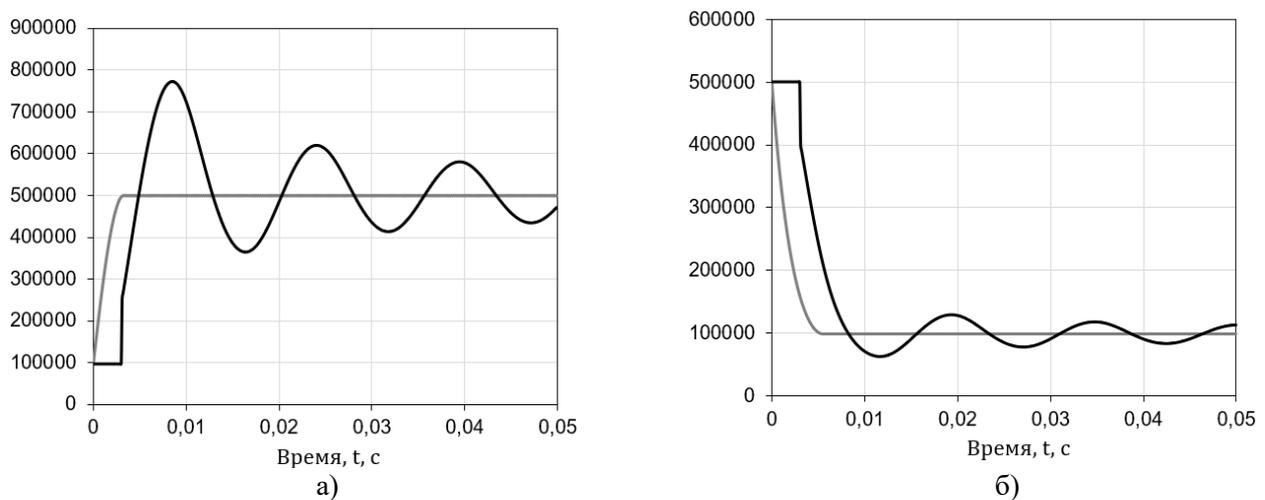


Рисунок 8 – Графики изменения давления в конце пневматического мускула без сопротивления на входе: серая сплошная кривая – результаты расчета по модели камеры (4), черная сплошная кривая – результаты расчета по модели трубопровода: а) при наполнении пневмомускула, б) при опустошении пневмомускула

Как видно из полученных графиков, в отличие от модели камеры уточненная математическая модель пневматического мускула как трубопровода учитывает задержку во времени поступления давления в конец оболочки пневмомускула, фронт ударной волны и колебательные процессы, обусловленные упругими свойствами газа.

### 6. Модель пневматического мускула в виде трубопровода с подводящим трубопроводом

Расчетная схема оболочки пневматического мускула в виде трубопровода с подводящим трубопроводом представлена рис. 9.

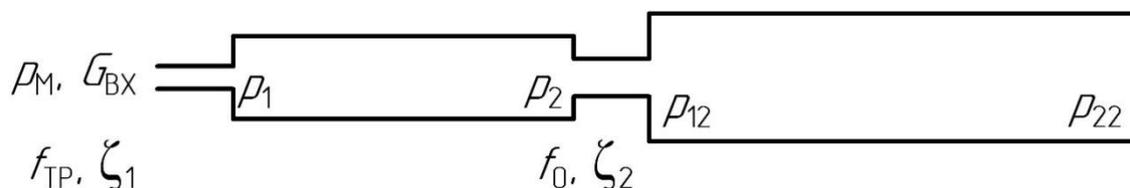


Рисунок 9 – Расчетная схема пневмомускула в виде трубопровода с подводящим трубопроводом

Движение массы газа, заключенного в трубопроводе происходит под действием перепада давлений  $p_1$  и  $p_2$  на концах трубопровода. Средний расход газа  $G$ , расход газа  $G_1$  на входе в трубопровод и расход газа  $G_2$  на выходе из трубопровода изменяются в переходном процессе. За счет разности расходов газа по отношению к среднему расходу в трубопроводе происходит изменение давления на входе  $p_1$ , а за счет суммы среднего расхода и расхода на выходе из трубопровода происходит изменение давления  $p_2$ .

Давление на входе в пневмомускул  $p_{12}$  изменяется за счет разности расходов газа, выходящего из трубопровода,  $G_2$ , по отношению к среднему расходу  $G_{пм}$ . Давление  $p_{22}$  будет изменяться за счет изменения среднего расхода  $G_{пм}$ .

Для описания системы, представленной на рис. 9, были составлены следующие уравнения: уравнение движения газа в полости трубопровода, уравнение движения газа в полости пневматического мускула, уравнение среднего расхода, расхода у входа и расхода у выхода из трубопровода, уравнение среднего расхода, расхода у входа и расхода у выхода из пневматического мускула. Модель, учитывающая волновые процессы в оболочке пневмомускула в виде трубопровода с учетом подводящего трубопровода, будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
v' = \frac{\pi D_{\text{ТР}}^2}{4m} (p_1 - p_2^* - p_{\text{ТР}}), \\
v_2' = \frac{\pi D_0^2}{4m} (p_{12} - p_{22}^* - p_{\text{ТР}2}) \\
p_2^* = \begin{cases} p_{20}; & t < L_{\text{ТР}} / c \\ p_2; & t \geq L_{\text{ТР}} / c, \end{cases} \\
p_{22}^* = \begin{cases} p_{220}; & t < L_0 / c \\ p_{22}; & t \geq L_0 / c, \end{cases} \\
p_1' = \frac{2RT}{f_{\text{ТР}} L_{\text{ТР}}} \left( m_A' - \frac{m}{L_{\text{ТР}}} v \right), \\
p_{12}' = \frac{2RT}{f_0 L_0} \left( m_2' - \frac{m}{L_0} v_2 \right), \\
p_2' = \frac{2RT}{f_{\text{ТР}} L_{\text{ТР}}} \left( \frac{m}{L_{\text{ТР}}} v + m_B' \right), \\
p_{22}' = \frac{2RT}{f_0 L_0} \frac{m_2}{L_0} v_2, \\
p_{\text{ТР}} = \lambda \frac{L_{\text{ТР}}}{D_{\text{ТР}}} \frac{\rho_0 v^2}{2} \text{sign}(v), \\
p_{\text{ТР}2} = \lambda \frac{L_0}{D_0} \frac{\rho v_2^2}{2} \text{sign}(v), \\
m' = m_A' + m_B', \\
m_A' = \frac{f_1}{\sqrt{\zeta_1 RT_M}} \sqrt{(p_M^2 - p_1^2) \Phi(p_M - p_1)} - \frac{f_1}{\sqrt{\zeta_1 RT_M}} \left( \frac{p_1}{p_M} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{(p_1^2 - p_M^2) \Phi(p_1 - p_M)}, \\
m_B' = -\frac{f_0}{\sqrt{\zeta_2 RT_M}} \left( \frac{p_{12}}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{(p_2^2 - p_{12}^2) \Phi(p_2 - p_{12})} + \frac{f_0}{\sqrt{\zeta_2 RT_M}} \sqrt{(p_{12}^2 - p_2^2) \Phi(p_{12} - p_2)}, \\
m_{\text{ГМ}}' = \frac{f_0}{\sqrt{\zeta_2 RT_M}} \sqrt{(p_2^2 - p_{12}^2) \Phi(p_2 - p_{12})} - \frac{f_0}{\sqrt{\zeta_2 RT_M}} \left( \frac{p_{12}}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{(p_{12}^2 - p_2^2) \Phi(p_{12} - p_2)}.
\end{array} \right. \quad (6)$$

где  $v$  – средняя скорость газа в трубопроводе,  $m$  – текущее значение массы газа, заключенной внутри трубопровода и пневмомускула,  $D_{\text{ТР}}$  – диаметр трубопровода,  $p_1$  – давление сразу за входом в трубопровод,  $p_2^*$  – давление, характеризующее динамическое сжатие газа на конце трубопровода,  $p_{20}$  – начальное давление на конце трубопровода,  $p_{\text{ТР}}$  – потери давления на трение внутри трубопровода,  $p_2$  – давление во второй половине трубопровода,  $v_2$  – средняя скорость газа в пневмомускуле,  $D_0$  – диаметр пневмомускула,  $p_{12}$  – давление сразу за входом в пневмомускул,  $p_{22}^*$  – давление, характеризующее динамическое сжатие газа на конце пневмомускула,  $p_{220}$  – начальное давление на конце пневмомускула,  $p_{\text{ТР}2}$  – потери давления на трение внутри пневмомускула,  $p_{22}$  – давление во второй половине пневмомускула,  $f_{\text{ТР}}$  – площадь поперечного сечения трубопровода,  $f_{\text{ТР}} = \pi D_{\text{ТР}}^2/4$ ,  $L_{\text{ТР}}$  – длина трубопровода,  $f_0$  – площадь поперечного сечения пневмомускула,  $f_0 = \pi D_0^2/4$ ,  $L_0$  – длина пневмомускула,  $f_1$  – площадь поперечного сечения подводящей линии трубопровода,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T_M$  – температура газа в магистрали,  $\zeta_1$  – коэффициент сопротивления пневмоаппаратуры на входе,  $p_M$  – давление магистрали,  $t$  – время распространения волны давления в начале переходного процесса,  $c$  – скорость звука,  $\lambda$  – коэффициент трения воздуха,  $V_0$  – начальный

объем пневмомускула,  $\rho_0$  – средняя по длине плотность газа в трубопроводе,  $\rho$  – средняя по длине плотность газа в пневмомускуле,  $m_A$  – изменение массы газа, поступающей в трубопровод,  $m_B$  – изменение массы газа, поступающей в трубопровод,  $m_{ПМ}$  – изменение массы газа, поступающей в пневмомускул.

### 7. Модель пневматического мускула в виде камеры с подводящим трубопроводом

Расчетная схема оболочки пневматического мускула в виде камеры с подводящим трубопроводом представлена рис. 10.

Для описания системы, представленной на рис. 10 необходимо составить следующие уравнения: уравнение движения газа в полости трубопровода, уравнение среднего расхода, расхода у входа и расхода у выхода из трубопровода, уравнение расхода в пневматический мускул.

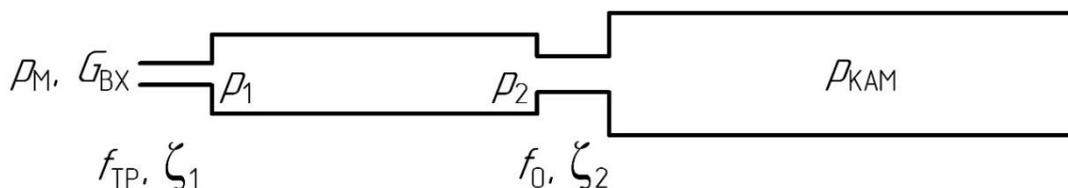


Рисунок 10 – Расчетная схема пневмомускула в виде камеры с подводящим трубопроводом

Для описания системы, приведенной на рис. 10 необходимо составить уравнение движения газа в полости трубопровода, уравнение среднего расхода, расхода у входа и расхода у выхода из трубопровода, уравнение расхода в ПМ.

Исходя из рисунка математическая модель ПМ как камеры примет вид:

$$\begin{cases} m'_{ПМ} = \frac{f_0}{\sqrt{\zeta_0 RT}} \sqrt{(p_2^2 - p_{КАМ}^2) \Phi(p_2 - p_{КАМ})} - \\ - \frac{f_0}{\sqrt{\zeta_0 RT}} \left( \frac{p_2}{p_{КАМ}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{(p_{КАМ}^2 - p_2^2) \Phi(p_{КАМ} - p_2)}, \\ p'_{КАМ} = \frac{2RT}{VL} m'_{ПМ}. \end{cases} \quad (7)$$

Модель, учитывающая волновые процессы в оболочке пневмомускула в виде камеры с учетом подводящего трубопровода, будет иметь вид с учетом модели (7):

$$\left\{ \begin{array}{l}
mv' = f_{\text{ТР}} (p_1 - p_2^* - p_{\text{ТР}}), \\
p_2^* = \begin{cases} p_{20}; & t < L_{\text{ТР}} / c \\ p_2; & t \geq L_{\text{ТР}} / c, \end{cases} \\
p_1' = \frac{2RT_{\text{М}}}{f_{\text{ТР}} L_{\text{ТР}}} \left( m'_A - \frac{m}{L_{\text{ТР}}} v \right), \\
p_2' = \frac{2RT_{\text{М}}}{f_{\text{ТР}} L_{\text{ТР}}} \left( \frac{m}{L_{\text{ТР}}} v + m'_B \right), \\
p_{\text{ТР}} = \lambda \frac{L_{\text{ТР}}}{D_{\text{ТР}}} \frac{\rho v^2}{2} \text{sign}(v), \\
p'_{\text{КАМ}} = \frac{2RT_{\text{М}}}{V_0 L_0} m', \\
m'_A = \frac{f_1}{\sqrt{\zeta_1 RT_{\text{М}}}} \sqrt{(p_{\text{М}}^2 - p_1^2) \Phi(p_{\text{М}} - p_1)} - \frac{f_1}{\sqrt{\zeta_1 RT_{\text{М}}}} \left( \frac{p_1}{p_{\text{М}}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{(p_1^2 - p_{\text{М}}^2) \Phi(p_1 - p_{\text{М}})}, \\
m'_B = -\frac{f_0}{\sqrt{\zeta_2 RT_{\text{М}}}} \left( \frac{p_{12}}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{(p_2^2 - p_{12}^2) \Phi(p_2 - p_{12})} + \frac{f_0}{\sqrt{\zeta_2 RT_{\text{М}}}} \sqrt{(p_{12}^2 - p_2^2) \Phi(p_{12} - p_2)}, \\
m'_{\text{ПМ}} = \frac{f_0}{\sqrt{\zeta_0 RT_{\text{М}}}} \sqrt{(p_2^2 - p_{\text{КАМ}}^2) \Phi(p_2 - p_{\text{КАМ}})} - \\
-\frac{f_0}{\sqrt{\zeta_0 RT_{\text{М}}}} \left( \frac{p_2}{p_{\text{КАМ}}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{(p_{\text{КАМ}}^2 - p_2^2) \Phi(p_{\text{КАМ}} - p_2)},
\end{array} \right. \quad (8)$$

где  $v$  – средняя скорость газа в трубопроводе,  $m$  – текущее значение массы газа, заключенной внутри трубопровода и пневмомускула,  $D_{\text{ТР}}$  – диаметр трубопровода,  $p_1$  – давление сразу за входом в трубопровод,  $p_2^*$  – давление, характеризующее динамическое сжатие газа на конце трубопровода,  $p_{20}$  – начальное давление на конце трубопровода,  $p_{\text{ТР}}$  – потери давления на трение внутри трубопровода,  $p_2$  – давление во второй половине трубопровода,  $v_2$  – средняя скорость газа в пневмомускуле,  $D_0$  – диаметр пневмомускула,  $f_0$  – площадь поперечного сечения трубопровода,  $f_{\text{ТР}} = \pi D_{\text{ТР}}^2/4$ ,  $L_{\text{ТР}}$  – длина трубопровода,  $f_0$  – площадь поперечного сечения пневмомускула,  $f_0 = \pi D_0^2/4$ ,  $L_0$  – длина пневмомускула,  $f_1$  – площадь поперечного сечения подводящей линии трубопровода,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T_{\text{М}}$  – температура газа в магистрали,  $\zeta_1$  – коэффициент сопротивления пневмоаппаратуры на входе,  $p_{\text{М}}$  – давление магистрали,  $t$  – время распространения волны давления в начале переходного процесса,  $c$  – скорость звука,  $\lambda$  – коэффициент трения воздуха,  $V_0$  – начальный объем пневмомускула,  $m'_A$  – изменение массы газа, поступающей в трубопровод,  $m'_B$  – изменение массы газа, вытекающей из трубопровода,  $m'_{\text{ПМ}}$  – изменение массы газа, поступающей в пневмомускул,  $p_{12}$  – давление на выходе из трубопровода,  $\zeta_2$  – коэффициент сопротивления пневмоаппаратуры на выходе,  $\zeta_0$  – коэффициент сопротивления пневмоаппаратуры на входе в пневмомускул,  $p_{\text{КАМ}}$  – давление в пневмомускуле.

На рис. 10 представлены результаты моделирования по моделям (6) и (8) при изменении давления на входе в подводящий трубопровод по закону

$$p_{\text{М}} = \frac{(p_{\text{М}0} - p_{\text{А}})}{2} \left[ \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + 1 \right] + p_{\text{А}}.$$

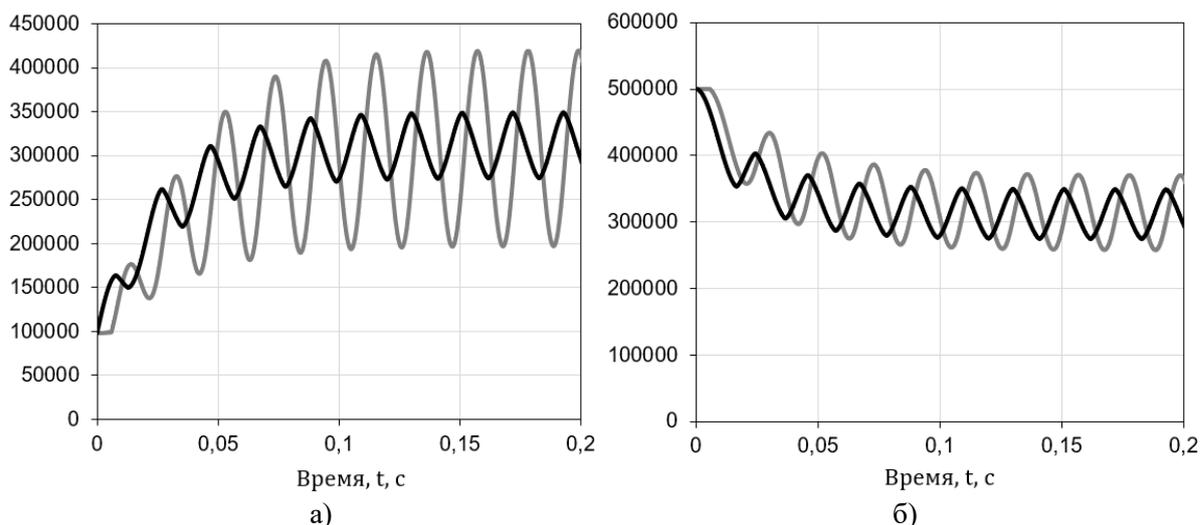


Рисунок 11 – Графики изменения давления в пневматическом мускуле: черная кривая – результаты расчета по модели (6), серая кривая – результаты расчета по модели (8): а) при наполнении пневмомускула, б) при опустошении пневмомускула

Из рис. 11 видно, что с увеличением длины пневмомускула целесообразность расчета по модели (6) увеличивается, так как увеличиваются колебательные процессы в оболочке пневмомускула.

Таким образом, были разработаны следующие математические модели:

- модель пневматического мускула в виде линии без учета подводящего трубопровода;
- модель пневматического мускула в виде камеры без учета подводящего трубопровода;
- модель пневматического мускула в виде линии с учетом подводящего трубопровода;
- модель пневматического мускула в виде камеры с учетом подводящего трубопровода.

## 8. Синтез принципиальных схем пневматического манипулятора мускульного типа. Модель для расчета динамических характеристик манипулятора мускульного типа

Перед разработкой новой принципиальной схемы манипулятора мускульного типа был выполнен обзор существующих промышленных устройств мускульного типа. Многие работы посвящены синтезу промышленных устройств с пневмомускулом в качестве привода с автоматической системой управления, разработка которой требует сложного математического моделирования и использования дополнительных устройств. Поскольку пневматические манипуляторы в основном используются в промышленности в областях, где не требуется высокой точности позиционирования, было принято решение разработать принципиальную схему манипулятора для различных транспортных операций небольшой грузоподъемности. Существуют манипуляторы мускульного типа с ручным управлением, разработанные компанией «Рекорд-инжиниринг». Однако они имеют следующие недостатки: не являются сбалансированными и не предусматривают автоматического уравнивания руки манипулятора с грузом и без груза.

Основными составными частями пневмосхемы манипулятора на рис. 12 являются: блок подготовки воздуха (БПВ); привод мускульного типа (ПМ); захватное устройства (ЗУ), на котором расположен пульт управления работой манипулятора; распределитель Р1, осуществляющий переключение режимов подъема/спуска руки манипулятора; распределитель Р2, который приводит в действие пневмоцилиндр ПЦ захватного устройства; дроссель ДР1, который служит для настройки скорости подъема и спуска руки манипулятора.

Предложенное устройство обладает следующими достоинствами по сравнению с рассмотренными выше: в новой схеме устройства предусмотрено три рабочих режима: автоматическое уравнивание руки манипулятора при его включении, автоматический подъем/опускание груза на необходимую высоту, уравнивание руки с грузом при его



устройства (ЗУ), на котором расположен пульт управления работой манипулятора, распределитель Р1, осуществляющий переключение ЗУ для захвата груза, пневмоклапан последовательности П-КМ, установленный для предотвращения случайного отпущения груза, дроссель ДР1, который служит для настройки скорости подъема и спуска руки манипулятора. В схеме был применен аналоговый редуционный клапан для избежания настройки схемы при изменении веса поднимаемого груза.

На основе ранее представленной модели (2) была разработана математическая модель для исследования динамических характеристик манипулятора мускульного типа, которая выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 (M_{\text{ПР}} + M_{\text{ГР}})x'' = T - N_{\text{ПР}} - N_{\text{ГР}} - hx', \\
 M_{\text{ПР}} = m_{\text{ПР}}K, \\
 M_{\text{ГР}} = m_{\text{ГР}}K, \\
 N_{\text{ПР}} = M_{\text{ПР}}g, \\
 N_{\text{ГР}} = M_{\text{ГР}}g, \\
 p' = a \frac{kf\sqrt{RT_M}}{V\sqrt{\zeta_H}} \sqrt{p_M^2 - p^2} + (a-1) \frac{kf\sqrt{RT_M}}{V\sqrt{\zeta_B}} \left(\frac{p}{p_M}\right)^{\frac{k-1}{k}} \sqrt{p^2 - p_A^2} - \frac{kp}{V}V', \\
 T = \frac{(p_M - p_A)D_0 \left(1 - \frac{x}{L_0}\right)^2}{2} - \frac{c(p) \left[ \left(1 - \frac{x}{L_0}\right) \text{tg}\alpha - \text{tg}\alpha_0 \right]}{\text{tg}\alpha_0 \text{tg}\alpha} - \\
 - \pi D_0 c(p) \frac{x}{L_0} - \frac{\pi D_0^2 (p_M - p_A)}{4}, \\
 V = \frac{\pi D^2}{4} (L_0 - x), \\
 D = D_0 \left(1 - \frac{x}{L_0}\right) \frac{\text{tg}(\alpha)}{\text{tg}(\alpha_0)}, \\
 \alpha = \arccos \left[ \left(1 - \frac{x}{L_0}\right) \cos(\alpha_0) \right], \\
 c(p) = rp + q.
 \end{array} \right. \quad (9)$$

где  $M_{\text{ПР}}$  – приведенная масса подвижных частей манипулятора,  $M_{\text{ГР}}$  – приведенная масса груза,  $N_{\text{ПР}}$  – приведенная статическая нагрузка от подвижных частей манипулятора,  $N_{\text{ГР}}$  – приведенная нагрузка от прикладываемого груза,  $T$  – усилие пневматического мускула,  $m_{\text{ПР}}$  – масса подвижных частей манипулятора,  $m_{\text{ГР}}$  – масса груза,  $hx'$  – сила вязкого демпфирования,  $h$  – коэффициент вязкого демпфирования,  $K$  – коэффициент усиления манипулятора,  $p$  – текущее значение давления в оболочке пневмомускула.  $p_M$  – давление в магистральной линии,  $p_A$  – атмосферное давление,  $D_0$  – диаметр оболочки пневмомускула до подачи давления,  $D$  – диаметр оболочки пневмомускула после подачи давления,  $x$  – перемещение пневмомускула,  $L_0$  – длина оболочки до подачи давления,  $V$  – объем оболочки пневмомускула после подачи давления,  $c(p)$  – жесткость пневмомускула, где  $r$ ,  $q$  – корректировочные коэффициенты,  $\alpha_0$  – угол укладки сетки корда до подачи давления,  $\alpha$  – угол укладки сетки корда после подачи давления,  $a$  – коэффициент, определяющий процесс, происходящий в оболочке,  $k$  – показатель адиабаты,  $f_H$  – площадь поперечного сечения подводящей линии трубопровода,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T_M$  – температура газа в магистрали,  $\zeta_H$  – сопротивление подводящей линии

трубопровода,  $f_B$  – площадь поперечного сечения линии выхлопа трубопровода,  $\zeta_B$  – сопротивление линии выхлопа трубопровода.

В результате расчета по модели (9) были получены графики переходных процессов манипулятора мускульного типа при поднятии и опускании груза, представленные на рис. 14.

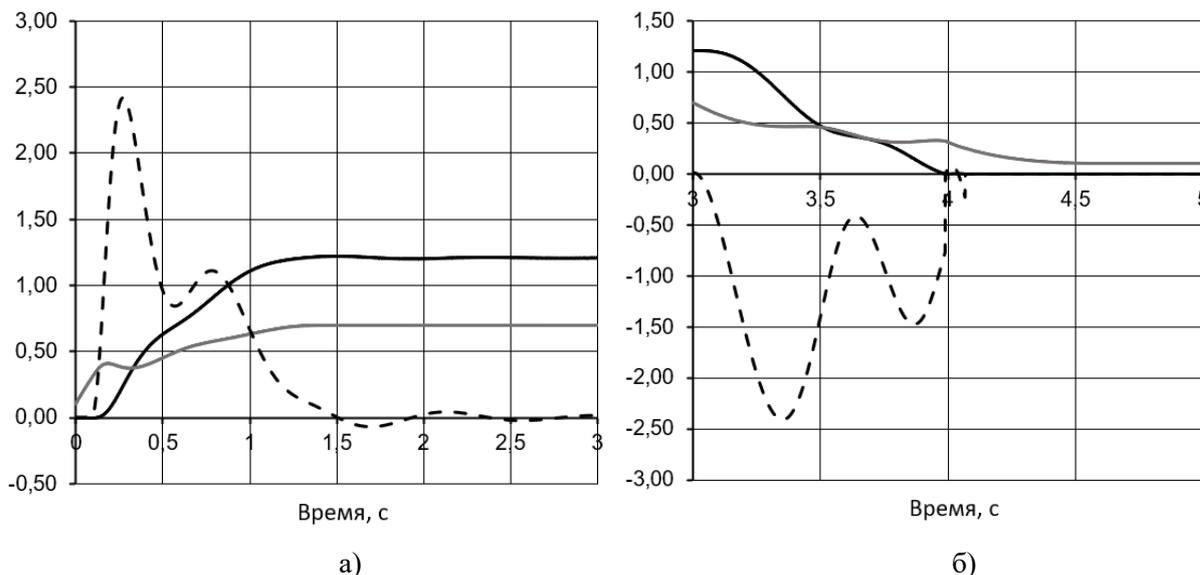


Рисунок 14 – Графики переходных процессов: черная сплошная кривая – перемещение, м; штриховая черная кривая – скорость, м/с; серая кривая – изменение давления в полости привода, МПа, Графики переходных процессов при опускании груза манипулятором; а) – при поднятии груза манипулятором, б) – при опускании груза манипулятором

Таким образом, разработанная модель позволяет рассчитать и оценить параметры и характеристики промышленного манипулятора мускульного типа на стадии проектирования.

### 9. Исследование режимов работы привода и манипулятора мускульного типа.

В работе были исследованы следующие режимы работы системы мускульного типа, в том числе и выходного звена промышленного манипулятора:

- исследования режимов позиционирования усилием оператора;
- исследование работы манипулятора в аварийном режиме (обрыв груза).

В первом пункте были исследованы режимы позиционирования привода мускульного типа и промышленного манипулятора мускульного типа.

Для исследования усилий оператора были использованы системы уравнений (3) для привода мускульного типа и системы уравнений (9) для манипулятора. Уравнения движения соответственно будут выглядеть:

$$mx'' = T - mg - hx' + Q, \quad (10)$$

$$(M_{\text{пр}} + M_{\text{гр}})x'' = T - N_{\text{пр}} - N_{\text{гр}} - hx' + Q, \quad (11)$$

где  $m$  – масса груза,  $T$  – усилие, развиваемое пневмомускулом,  $mg$  – вес груза,  $hx'$  – сила вязкого демпфирования,  $h$  – коэффициент вязкого демпфирования,  $Q$  – усилие оператора,  $M_{\text{пр}}$  – приведенная масса подвижных частей манипулятора,  $M_{\text{гр}}$  – приведенная масса груза,  $N_{\text{пр}}$  – приведенная статическая нагрузка от подвижных частей манипулятора,  $N_{\text{гр}}$  – приведенная нагрузка от прикладываемого груза.

Были рассмотрены следующие зависимости:

- зависимость  $Q(x)$  при подъеме и опускании груза на величину дополнительного перемещения  $\Delta x$ ;
- зависимость  $Q(\Delta x)$  для различных конструктивных параметров пневмомускула;

– зависимость дополнительного усилия  $\Delta Q(x)$  необходимого для поддержания груза в заданной позиции при изменении массы в конкретной точке.

Графики, полученные в результате исследования для типоразмера ПМ DMSP-10 представлены на рис. 15, 16, 17, 18. Таким же образом были получены графики для типоразмеров DMSP-20, DMSP-40.

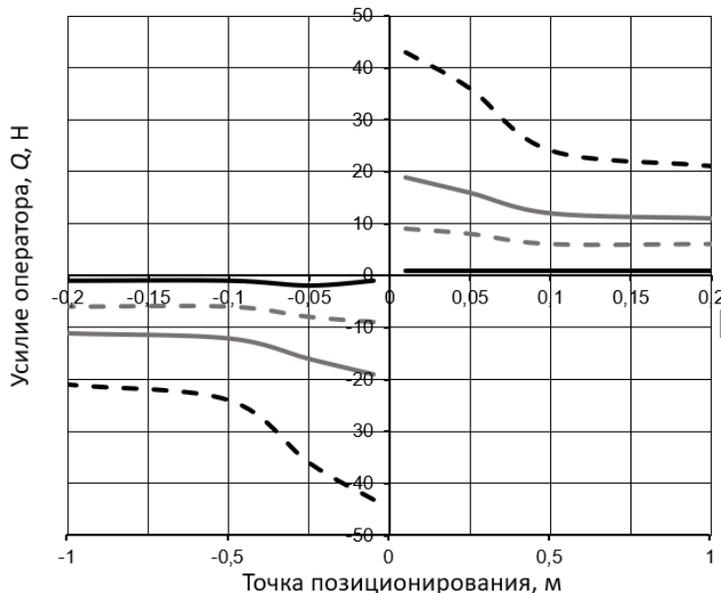


Рисунок 15 – Графики зависимости  $Q$  от точки позиционирования для DMSP-10,  $m = 10$  кг: черная кривая при  $\Delta x = 1$  мм ( $\Delta x_{II} = 5$  мм), серая штриховая кривая при  $\Delta x = 5$  мм ( $\Delta x_{II} = 10$  мм), серая сплошная кривая при  $\Delta x = 10$  мм ( $\Delta x_{II} = 50$  мм), черная штриховая кривая при  $\Delta x = 20$  мм ( $\Delta x_{II} = 100$  мм)

Из рис. 15 можно видеть, что с увеличением значения точки позиционирования (высоты подъема груза) уменьшается нагрузка на оператора (значение  $Q$ ) при подъеме груза. Такая зависимость справедлива для всех типоразмеров пневмомускулов FESTO. Из этого можно также сделать вывод, что чем выше значение давления, подаваемого в пневмомускул, тем легче осуществляется позиционирование привода.

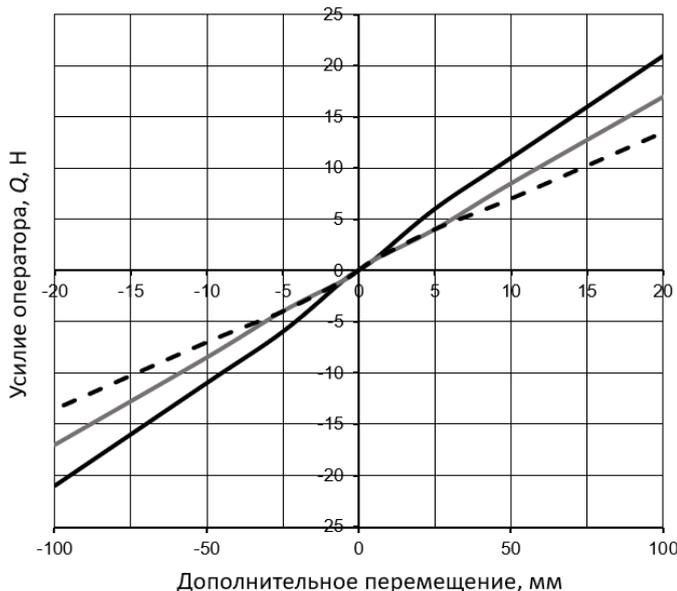


Рисунок 16 – Графики зависимости  $Q$  от дополнительного перемещения для DMSP-10,  $m = 10$  кг: черная кривая при  $L_0 = 1,5$  м, серая сплошная кривая при  $L_0 = 2$  м, черная штриховая кривая при  $L_0 = 3$  м

Как видно из рис. 16 усилие в одной и той же точке позиционирования будет варьироваться в зависимости от длины оболочки пневмомускула. Это связано с тем, что с увеличением длины  $L_0$  уменьшается необходимое значение давления для достижения заданной высоты подъема.

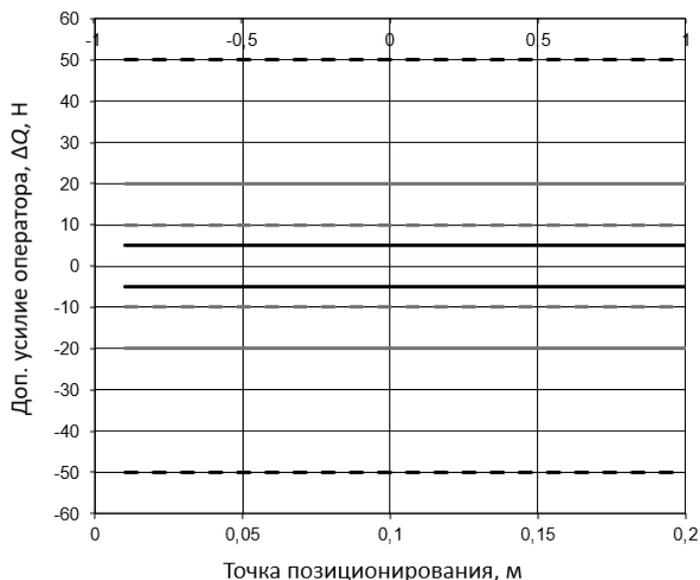


Рисунок 17 – зависимость дополнительного усилия оператора от точки позиционирования для DMSP-10,  $m = 10$  кг, DMSP-20,  $m = 20$  кг: черная кривая для  $\Delta m = 0,5$  кг, серая штриховая кривая для  $\Delta m = 1$  кг, серая сплошная кривая для  $\Delta m = 2$  кг, черная штриховая кривая для  $\Delta m = 5$  кг

Как видно из рис. 17 усилие  $\Delta Q$  будет прямо пропорционально добавочной массе  $\Delta m$  и будет одинаково в любой точке позиционирования  $x$ .

Также были получены графики в безразмерном виде, то есть для любой длины оболочки пневмомускула, для рабочего диапазона давлений и разных масс и предложена методика выбора параметров пневмомускула для обеспечения требуемого диапазона позиционирования. График зависимости  $Q(x)$  в безразмерном виде для DMSP-10 представлен на рис. 18.

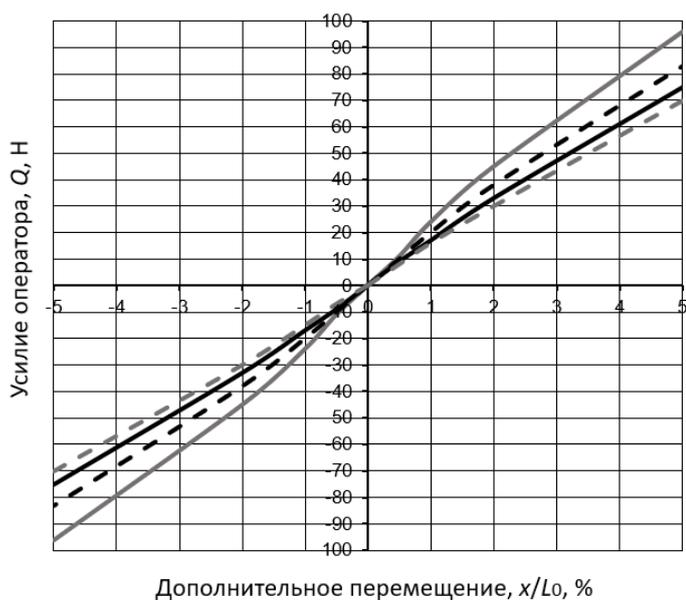


Рис. 18 – Графики зависимости  $Q$  от точки позиционирования для DMSP-10,  $m = 10$  кг: серая сплошная кривая при  $p_M = 0,3$  МПа, черная штриховая кривая при  $p_M = 0,4$  МПа, черная кривая при  $p_M = 0,5$  МПа, серая штриховая при  $p_M = 0,6; 0,7; 0,8$  МПа

Таким образом, модель позволяет оценить при заданных конструктивных параметрах

пневмомускула, при каких дополнительных перемещениях, высоте подъема и массе груза требуемое усилие оператора не будет превышать норму по ГОСТ 25057-84.

Во втором пункте был исследован аварийный режим работы разрабатываемого пневматического манипулятора. В результате моделирования были получены динамические характеристики манипулятора в случае обрыва груза, а затем предложено решение по устранению внезапного увеличения скорости и ускорения выходного звена. Было предложено применение в схеме устройства специальных устройств, гидродемпферов, подключаемых к полости пневматического мускула. Результаты моделирования представлены на рис. 18 и 19.

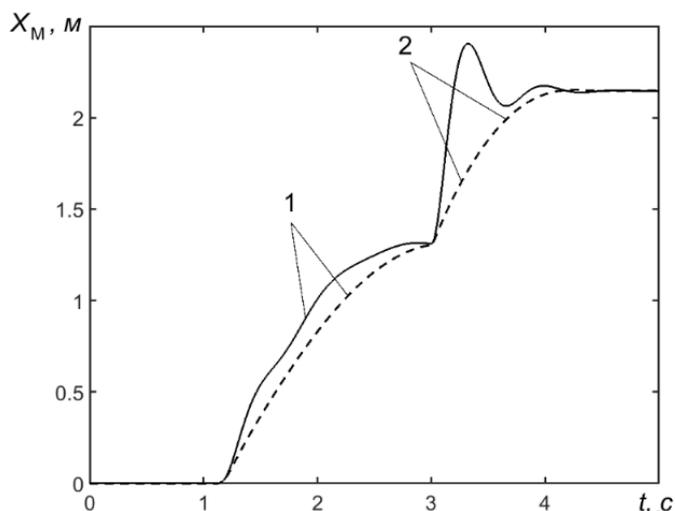


Рис. 18 – Динамические характеристики манипулятора мускульного типа: перемещение руки манипулятора, сплошная кривая – без установленного гидродемпфера, штриховая кривая – с установленным гидродемпфером; 1 – участок без обрыва груза, 2 – участок после обрыва груза

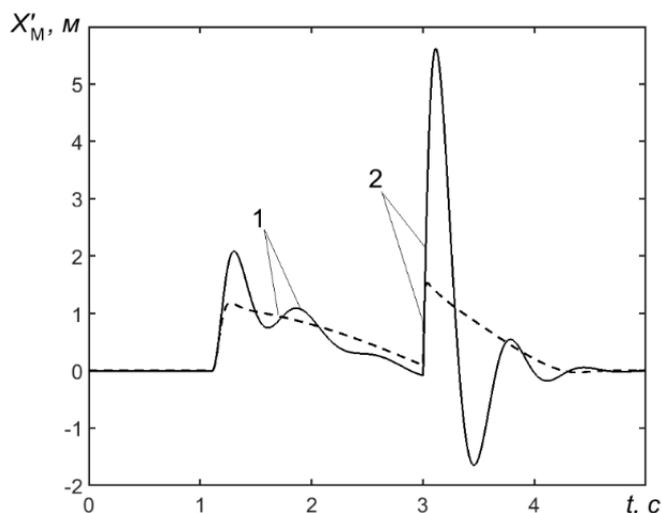


Рис. 19 – Динамические характеристики манипулятора мускульного типа: изменение скорости руки манипулятора; сплошная кривая – без установленного гидродемпфера, штриховая кривая – с установленным гидродемпфером; 1 – участок без обрыва груза, 2 – участок после обрыва груза

В результате моделирования была оценена и доказана возможность применения гидродемпферов для избежания последствий аварийных ситуаций.

Целью экспериментальных исследований являлась верификация предложенной математической модели. В соответствии с поставленной целью были проведены следующие серии экспериментов:

1) получение статических характеристик пневматического мускула во всем диапазоне рабочего давления и разных массах перемещаемого груза;

2) получение динамических характеристик (скорости, перемещения) пневматического мускула во всем диапазоне рабочего давления при разных массах перемещаемого груза и реализуемых пневматических схемах;

3) получение статических характеристик зависимости усилия оператора от различных параметров пневмомускула и массы перемещаемого груза.

Принципиальная схема и фото стенда для исследования статических характеристик пневматического мускула представлены на рис. 20.

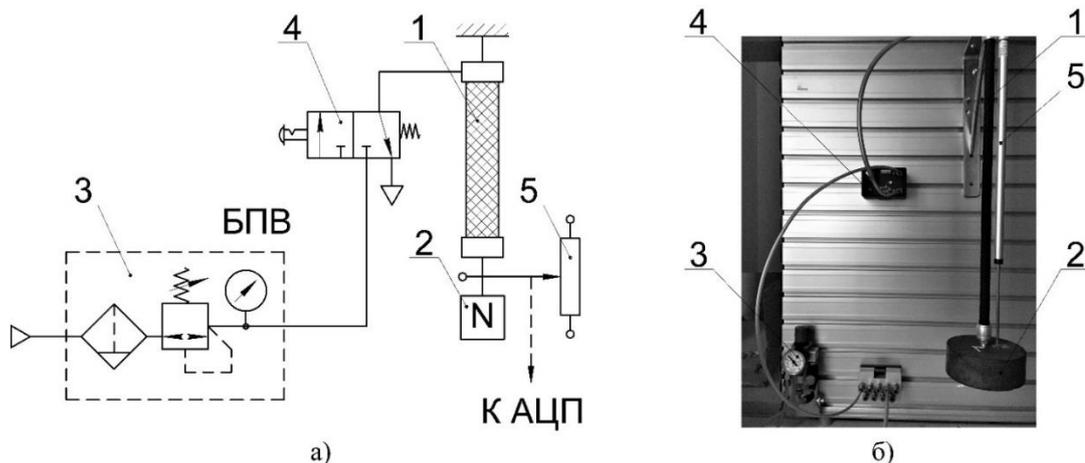


Рисунок 20 – Экспериментальная установка: а – принципиальная схема: 1 – пневмомускул FESTO DMSP-10-400N-PM-CM, 2 – груз, 3 – блок подготовки воздуха (БПВ) FESTO LFR-QS4-5M-MICRO, 4 – распределитель FESTO DIDACTIC D:S-PSV-3/2-S-3+S, 5 – лазерный датчик перемещения TWK D-40041 RP 12/300; б – фото

На рис. 21 представлены результаты моделирования и эксперимента для массы груза  $m = 2,5$  кг. Были получены следующие статические характеристики пневмомускула:  $\varepsilon(p)$ , где  $p$  – рабочее давление,  $\varepsilon$  – относительное изменение длины пневмомускула,  $\varepsilon = x/L_0$  ( $x$  – ход пневмомускула,  $L_0$  – начальная длина оболочки) и  $\lambda(p)$ , где  $\lambda$  – относительное изменение диаметра,  $\lambda = \Delta D/D_0$  ( $\Delta D$  – изменение диаметра,  $D_0$  – начальный диаметр оболочки). Таким же образом были получены результаты для других масс груза,  $m = 5$  кг и  $m = 7,5$  кг.

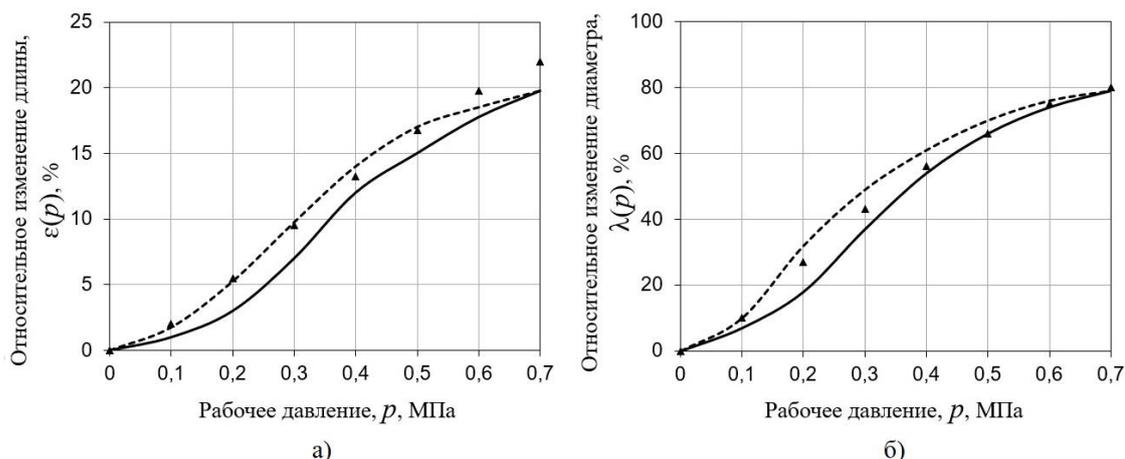


Рисунок 21 – Сравнение результатов эксперимента с результатами моделирования для массы груза  $m = 2,5$  кг: а) –  $\varepsilon(p)$ , б) –  $\lambda(p)$ , сплошные кривые – результаты при подъеме пневмомускулом груза, штриховые кривые – результаты при опускании пневмомускулом груза, точки – результаты моделирования

Принципиальная схема станда для исследования статических характеристик зависимости усилия оператора от различных параметров пневмомускула и массы перемещаемого груза представлена на рис. 22.

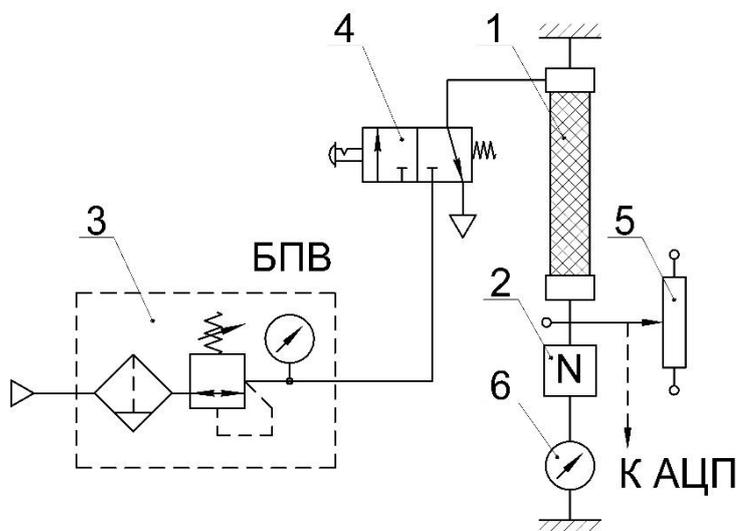


Рисунок 22 – Экспериментальная установка: принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – пневмомускул FESTO DMSP-10-400N-PM-CM, 2 – груз, 3 – блок подготовки воздуха (БПВ) FESTO LFR-QS4-5M-MICRO, 4 – распределитель FESTO DIDACTIC D:S-PSV-3/2-S-3+S, 5 – лазерный датчик перемещения TWK D-40041 RP 12/300, 6 – тензомер TD112,

На рис. 23 представлены результаты эксперимента при дополнительном перемещении пневмомускула  $\Delta x = 0,001$  м. Так же были получены результаты для следующих перемещений:  $\Delta x = -0,001$  м;  $\pm 0,005$  м;  $\pm 0,01$  м для массы  $m = 5$  кг.

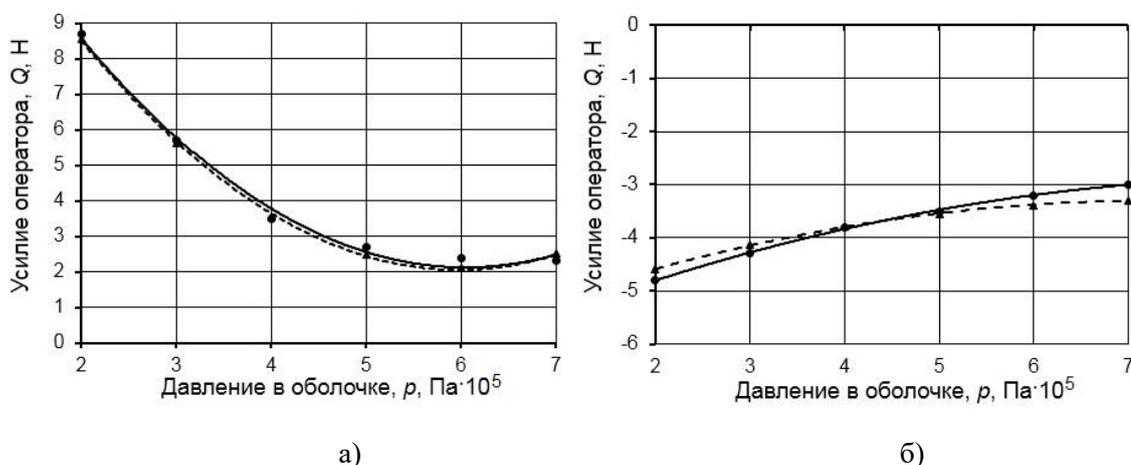
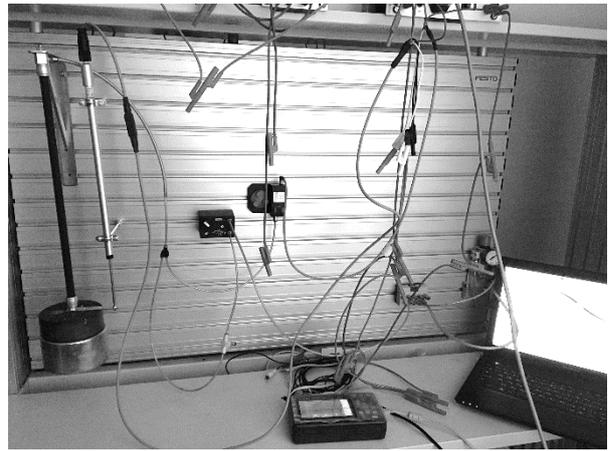
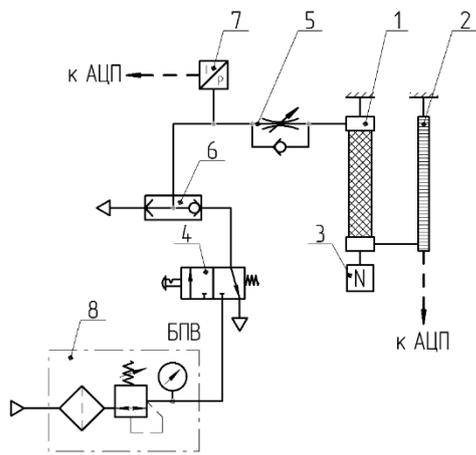


Рисунок 23 – График зависимости усилия оператора от давления в оболочке пневмомускула при дополнительном перемещении пневмомускула,  $\Delta x = 0,001$  м: а) при положительном перемещении; б) при отрицательном перемещении; данные моделирования – сплошная данные эксперимента – штриховая кривая

Принципиальная схема и фото станда для исследования динамических характеристик пневматического мускула представлены на рис. 24.

Перед экспериментом было выполнено моделирование динамических характеристик пневматического мускула (перемещения и изменения давления в оболочке) для масс груза  $m = 2,5; 5; 7,5$  кг и диапазона давлений  $p = 0,1 - 0,7$  МПа.

На рис. 25, 26, 27, 28 представлены результаты моделирования и эксперимента для разных масс груза и давления, подаваемого в оболочку. Сплошными кривыми обозначены результаты моделирования, а штриховыми кривыми – результаты эксперимента.

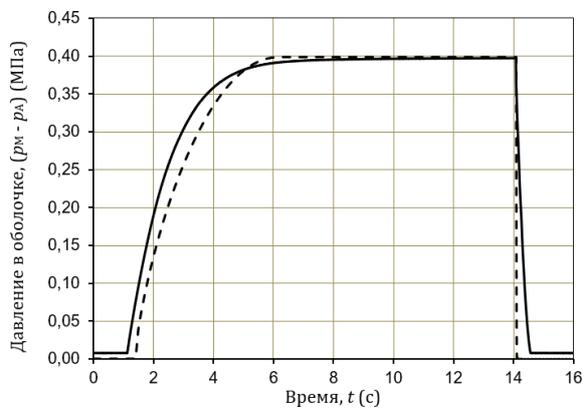


а)

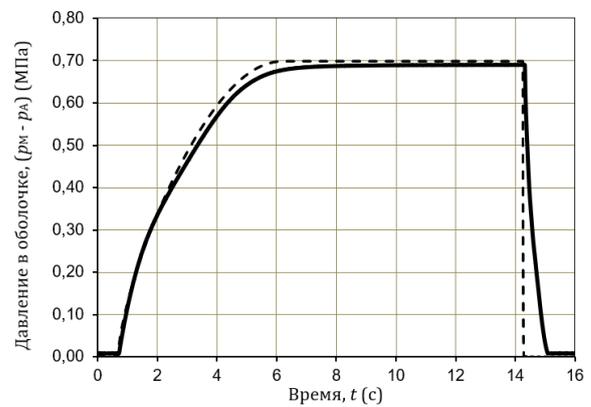
б)

Рисунок 24 – Экспериментальная установка для исследования динамических характеристик пневматического мускула: а) принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – пневматический мускул FESTO DMSP-10-400N-PM-CM, 2 – датчик движения TWK D-40041 RP 12/300, 3 – груз, 4 – пневматический распределитель FESTO DIDACTIC D: S-PSV-3/2-S-3+S, 5 – дроссель, 6 – клапан быстрого выхлопа, 7 – датчик давления FESTO SDE1-D10-G2-H18-C-PU-M8, 8 – блок подготовки воздуха FESTO LFR-QS4-5M-MICRO

Количественная и качественная оценка математической модели производилась путем сравнения мгновенных характеристик изменения давления в оболочке и хода груза. На рис. 25, 26, 27, 28 представлено сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных изменения давления в оболочке пневмомускула и перемещения груза для разных рабочих режимов и массы груза  $m = 2,5$  кг; 7,5 кг. Сплошными кривыми обозначены результаты моделирования, а штриховыми кривыми – результаты эксперимента.

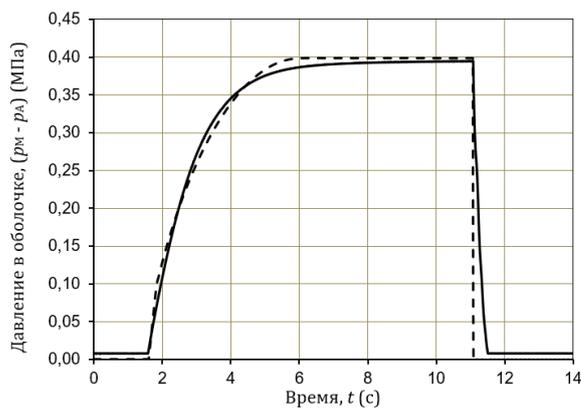


а)

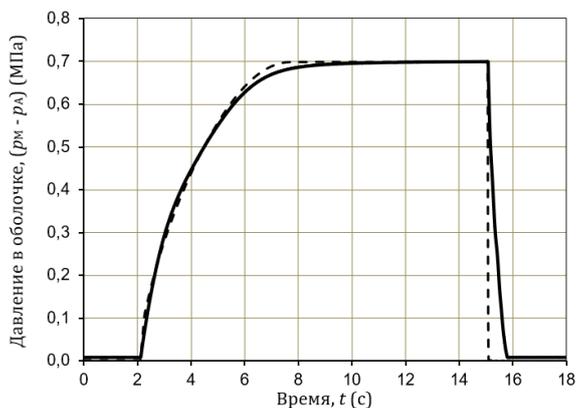


б)

Рисунок 25 – Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных изменения давления в оболочке пневмомускула для массы груза  $m = 2,5$  кг: а) при давлении в магистрали  $p_M = 0,5$  МПа; б) при давлении в магистрали  $p_M = 0,8$  МПа

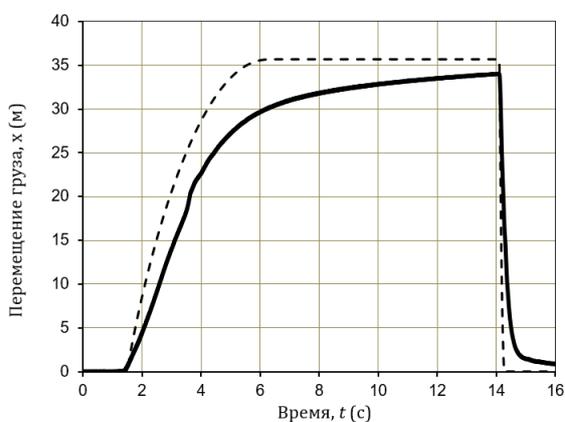


а)

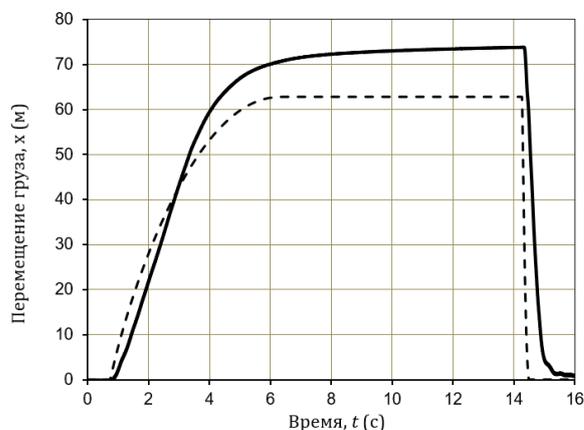


б)

Рисунок 26 – Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных изменения давления в оболочке пневмомускула для массы груза  $m = 7,5$  кг: а) при давлении в магистрали  $p_M = 0,5$  МПа; б) при давлении в магистрали  $p_M = 0,8$  МПа

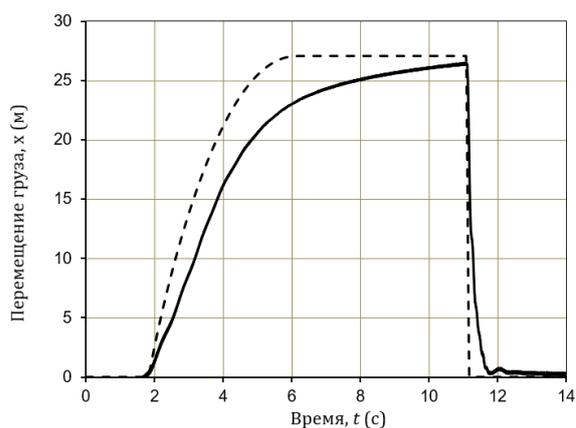


а)

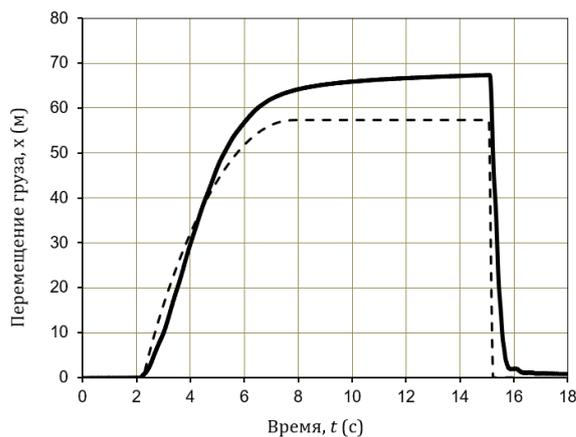


б)

Рисунок 27 – Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных перемещения груза для массы груза  $m = 2,5$  кг: а) при давлении в магистрали  $p_M = 0,5$  МПа; б) при давлении в магистрали  $p_M = 0,8$  МПа



а)



б)

Рисунок 28 – Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных перемещения груза для массы груза  $m = 7,5$  кг: а) при давлении в магистрали  $p_M = 0,5$  МПа; б) при давлении в магистрали  $p_M = 0,8$  МПа

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Из приведенных результатов на рис. 21 можно сделать вывод, что модель качественно правильно описывает изменение давления – кривая, построенная по результатам моделирования, отражает закон изменения длины и диаметра в зависимости от давления в оболочке пневмомускула. Количественная оценка показала, что, в целом, разработанная модель дает удовлетворительную сходимость результатов моделирования для зависимостей  $\varepsilon(p)$  и  $\lambda(p)$  (в пределах 15,5 %) с экспериментальными данными на режимах с высоким рабочим давлением ( $p = 0,3 - 0,7$  МПа) как для линии наполнения, так и для линии опустошения.

2. Представленные результаты на рис. 23 позволяют сделать вывод, что кривые, полученные расчетным путем, дают правильное качественное и количественное описание изменения усилия оператора в зависимости от подаваемого давления в оболочку пневмомускула. Полученные результаты подтверждают адекватность разработанной математической модели экспериментальным данным.

3. Представленные результаты на рис. 25 – 28 позволяют утверждать, что разработанные математические модели для динамических характеристик показали хорошую качественную и количественную сходимость изменения давления в оболочке и хода пневмомускула с экспериментом. Максимальное количественное расхождение при моделировании изменения давления в оболочке пневмомускуле можно отметить на отрезках переходного процесса, максимальное значение которого составляет 17 % для массы  $m = 2,5$  кг и режима  $p_M = 0,5$  МПа. Максимальное количественное расхождение при моделировании перемещения груза можно отметить на отрезках переходного процесса, максимальное значение которого составляет 20,6 % для массы  $m = 2,5$  кг и режима  $p_M = 0,5$  МПа. Максимальное отклонение перемещения груза на участке установившегося перемещения составляет 15 % для массы  $m = 7,5$  кг и режима  $p_M = 0,5$  МПа, что можно считать хорошим результатом.

### Заключение

Применение пневматического мускула вместо пневмоцилиндра в качестве привода в промышленных пневматических манипуляторах поможет создать манипулятор, отвечающий требованиям компактности, стабильности скорости, надежности, безопасности для оператора и окружающей среды, малой массы и габаритных размеров для заданной грузоподъемности. В настоящей работе был решен комплекс задач для обоснования и разработки промышленного манипулятора с приводом мускульного типа. В результате теоретических и экспериментальных исследований, а также поиска, анализа и синтеза необходимой информации были получены следующие результаты работы:

1. Разработана новая универсальная математическая модель для расчета усилия, развиваемого пневмомускулом. Обзор литературы помог учесть опыт моделирования предыдущих авторов, выполнить постановку задачи о моделировании усилия пневматического мускула с рядом необходимых допущений. Полученная модель отличается от предыдущих моделей универсальностью, минимумом корректирующих коэффициентов, отражает структуру и принцип действия исследуемого двигателя.

2. Предложена математическая модель для динамических характеристик привода мускульного типа для моделирования процессов подъема/спуска груза. Модель содержит минимум корректирующих коэффициентов, обладает универсальностью и позволяет выполнить необходимые инженерные расчеты без дополнительных преобразований на стадии проектирования привода мускульного типа.

3. Предложены и обоснованы математические модели пневматического мускула в виде пневматического трубопровода, учитывающие распределенность по длине таких параметров, как давление и расход.

4. Разработаны модели подводящего трубопровода без учета и с учетом его динамики.

5. Предложены динамические модели пневматического мускула в виде камеры с учетом и без учета динамики подводящего трубопровода. Проведено сравнение результатов расчета по

динамическим моделям пневматического мускула в виде камеры и пневматического мускула в виде линии и даны рекомендации.

6. Разработанная динамическая модель позволила получить теоретические зависимости для разных режимов позиционирования промышленного манипулятора в зависимости от конструкторских параметров двигателя, а также от разной массы груза, в том числе и аварийные режимы. Для избежания аварийных ситуаций было предложено и обосновано применение специальных устройств демпфирования. Также на основе динамической модели была разработана инженерная методика расчета промышленного манипулятора.

7. Разработана универсальная методика позиционирования промышленного манипулятора с помощью пневмоаппаратуры и с помощью ручного ориентирования груза усилием оператора.

8. Выполнен синтез принципиальных схем промышленного манипулятора, отличающихся от других расширенным диапазоном режимов, а также упрощенными схемами.

9. Спроектирован экспериментальный стенд для снятия статических и динамических характеристик пневматического мускула. Были получены статические и динамические экспериментальные зависимости перемещения пневмомускула от подаваемого давления, статические зависимости изменения диаметра оболочки пневмомускула от подаваемого давления, а также исследована зависимость усилия оператора от подаваемого давления. Верификация разработанной модели пневматического мускула показала хорошую сходимость результатов расчета и эксперимента.

#### **Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)**

##### **В изданиях из перечня ВАК:**

1. Донской А.С., Коткас Л.А. Математическое моделирование статических характеристик пневматического мускула // Вестник УГАТУ. 2018. № 4. С. 48-55.

2. Коткас Л.А., Донской А.С., Жарковский А.А. Математическое моделирование пневматического манипулятора мускульного типа // Известия МГТУ “МАМИ”. 2019. № 3. С. 47-56.

3. Коткас Л.А., Донской А.С., Жарковский А.А. Исследование позиционирования привода мускульного типа усилием оператора при вертикальном перемещении груза // Известия МГТУ “МАМИ”. 2020. № 1. С. 65-72.

##### **В изданиях, индексируемых Scopus:**

4. A Donskoj, Kotkas L.A., Salova T.P., Barilovich V., Girshov V., Mertens K., Cherkesov G., Fokin G., Akmetova I.G. Modelling the static and dynamic characteristics of pneumatic muscle // IOP Conference Series: Earth & Environmental Science; Nov2019, Vol. 337 Issue 1, p1-1, 1p.

5. Kotkas L., Zhurkin N., Donskoy A., Zharkovskij A. Mathematical modelling of balanced manually operated pneumatic artificial muscle manipulator in Matlab/Simulink environment // The 5<sup>th</sup> International Conference 2020 International conference on dynamics and vibroacoustic of machines (DVM)

##### **В прочих изданиях:**

6. Донской А.С., Коткас Л.А. Математическая модель пневматического мускула // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 13–19 ноября 2017 г. Институт энергетики. СПб.: Политех-Пресс, 2017. - С. 135-137.

7. Донской А.С., Коткас Л.А. Моделирование статических и динамических характеристик пневматических мускулов фирмы FESTO // Гидравлика. Электрон. журн. 2019. №7. URL: <http://hydrojournal.ru/images/JOURNAL/NUMBER7/DonskoyKotkas.pdf>

8. Донской А.С., Коткас Л.А. Динамические характеристики пневматического мускула // Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное

состояние и перспективы развития: сборник научных трудов международной научно-технической конференции. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 344-354.

9. Донской А.С., Коткас Л.А. Математическая модель пневматического мускула // Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития: сборник научных трудов международной научно-технической конференции. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 297-306.

10. Донской А.С., Коткас Л.А. Исследование динамических характеристик промышленного манипулятора мускульного типа // Гидравлика. Электрон. журн. 2019. № 9. URL: <http://hydrojournal.ru/images/JOURNAL/NUMBER9/Kotkas.pdf>

11. Донской А.С., Коткас Л.А. Экспериментальное исследование характеристик привода мускульного типа // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 18–23 ноября 2019 г. Институт энергетики. СПб.: Политех-Пресс, 2020. - С. 233-235.

12. Журкин Н.А. Моделирование пневматического мускула в среде ANSYS Mechanical APDL / Н.А. Журкин, Л.А. Коткас, А.С. Донской // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 18–23 ноября 2019 г. Институт энергетики. СПб.: Политех-Пресс, 2020. - С. 238-241.

13. Журкин Н.А. Математическое моделирование пневматического привода в среде Matlab Simulink // Н.А. Журкин, Л.А. Коткас // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 18–23 ноября 2019 г. Институт энергетики. СПб.: Политех-Пресс, 2020. - С. 242-244.

14. Журкин Н.А. Моделирование пневматических мускулов методом конечных элементов [электронный ресурс] / Н.А. Журкин, Л.А. Коткас // XXIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» (Москва, 4 декабря 2019 г.). Материалы конференции. - М.: Мир науки, 2019. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - С. 143-149.

15. Донской А.С., Коткас Л.А. Методика расчета пневматического привода мускульного типа // Донской А.С., Л.А. Коткас // XXIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» (Москва, 4 декабря 2019г.). Материалы конференции. - М.: Мир науки, 2019. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - С. 164-171.