

**Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого  
Институт машиностроения, материалов и транспорта**

На правах рукописи

**Чжао Вэнь**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ АВТОМАТОВ  
ДЛЯ ДОЗИРОВАНИЯ И ФАСОВАНИЯ СЫПУЧИХ ПРОДУКТОВ**

Направление подготовки

15.06.01 Машиностроение

---

*Код и наименование*

Направленность

15.06.01\_03 Роботы, мехатроника и робототехнические системы

---

*Код и наименование*

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Чжао Вэнь  
Научный руководитель:  
профессор, д.т.н.  
Жавнер Виктор Леонидович

Санкт Петербург – 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ/на кафедре Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой:

*–Мацко Ольга Николаевна  
к.т.н., доцент - Высшая школа  
автоматизации и  
робототехники, Санкт-  
Петербургский политехнический  
университет Петра Великого*

Научный руководитель:

*– Жавнер Виктор Леонидович  
д.т.н. Профессор - Высшая школа  
автоматизации и  
робототехники, Санкт-  
Петербургский политехнический  
университет Петра Великого*

Рецензент:

*– Павлов Евгений Евгеньевич  
к.т.н., гендиректор ООО  
«Химический ресурс»*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

Актуальность данной работы зависит от необходимости повышения производительности, снижения затрат на электроэнергию и уменьшения габарита оборудования дозирования при обеспечении требований к погрешности дозирования.

Дозирование сыпучих продуктов применяется в самых различных отраслях, а именно в пищевой, фармацевтической и химической промышленности, в производстве удобрений, пластмасс, на металлургических заводах, в строительной промышленности.

В пищевой промышленности и торговле развешиваются малыми дозами чай, соль, какао, кофе, сахар, приправы, пищевые добавки.

Основным направлением развития фасовочно-упаковочного оборудования является максимальная автоматизация производственного процесса при обеспечении сокращения цикла дозирования, контроля параметров, мониторинга процесса дозирования и снижения энергетических затрат.

Автоматизация процессов дозирования и фасования способствует сокращению вспомогательного времени, снижает себестоимость продукции, влияние человеческого фактора, отдаляя человека от объекта труда, и повышает безопасность.

Для решения задач автоматизации дозирования и фасования сыпучих продуктов применяются мехатронные принципы проектирования.

Решение проблем российской промышленности и общества, связанные с нехваткой трудовых ресурсов, высоким энергопотреблением технологического оборудования, связано в первую очередь с развитием мехатронных принципов проектирования.

Повышение производительности технологического оборудования обеспечивается также и разработкой рационального человеко-машинного интерфейса.

По сравнению с традиционным оборудованием, повышается конкурентоспособность мехатронного фасовочно-упаковочного оборудования. Во-первых, это обеспечивается технической идеологией проектирования. Исключается возможность быстрого дублирования за счет разработки специализированных систем управления.

Применение мехатронных принципов проектирования к тому же уменьшает влияние человеческого фактора, как с точки зрения технических ошибок, так и с точки зрения санитарно-гигиенических и террористических рисков.

Задача совершенствования технологических процессов дозирования, фасования и упаковывания сыпучих материалов решалась многими авторами, однако в научной литературе отсутствует систематический подход анализа и проектирования технологического оборудования этого типа.

Наиболее дешевым видом потребительской тары для сыпучих продуктов являются плоские пакеты. К сожалению, на современном рынке фасовочно-упаковочного оборудования выбор оборудования для дозирования и фасования сыпучих продуктов ограничен и в основном продается китайское оборудование, не всегда отличающееся надежностью. Остро стоит вопрос с фасованием сыпучих продуктов малыми дозами, что особенно актуально для предприятий фармацевтической и пищевой промышленности. Отметим также отсутствие российских разработок подобных устройств. Кроме того, на рынке отсутствует фасовочно-упаковочное оборудование для малых предприятий.

В связи с вышеуказанным, задачи разработки новых видов оборудования дозирования являются актуальными, особенно для малых предприятий.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертации является разработка системного подхода к проектированию фасовочно-упаковочного оборудования сыпучих продуктов с использованием мехатронных принципов проектирования.

Методология проектирования на основе системного подхода: бункер-питатель-дозатор-механизм размотки и протягивания упаковочного материала, сварочные процессы и отрезание упаковок.

- повышение производительности фасовочно-упаковочного оборудования;
- пути автоматического регулирования объема дозы в процессе фасования;
- уменьшение массогабаритных характеристик и снижение затрат энергии.

### **Научная новизна**

Исследованы процессы объёмного дозирования сыпучих продуктов с позиций обеспечения допустимой погрешности при коммерческом

дозировании и разработаны рекомендации по проектированию таких систем, в частности, для дозирования малыми дозами в фармацевтической, химической и пищевой промышленности.

Исследованы вопросы производительности фасовочного оборудования и разработаны требования к законам движения приводов дозаторов и протягивания упаковочного материала в дискретном режиме.

Исследованы вопросы формирования пакетов из ленточного упаковочного материала, что позволяет повысить скорость протягивания упаковочного материала, уменьшить линейные габариты и существенно упростить конструкцию.

Исследованы вопросы размотки рулонов с упаковочным материалом в дискретном режиме, что позволило решить задачу работы привода практически в постоянном режиме, без снижения производительности с минимальными затратами энергии. Автором получено положительное решение о выдаче патента на устройство для размотки, складывания и протягивания упаковочного материала.

Исследована возможность использования пневмоцилиндров в мехатронных пружинных приводах с рекуперацией диссипативных энергии.

Разработаны математические модели мехатронных пружинных приводов с рекуперацией энергии для привода шибберных дозаторов, что позволило обосновать целесообразность компенсации диссипативных потерь и сил трения в шибберных дозаторах при постоянном включении подачи давления на всём протяжении хода поршня и обеспечивая фиксацию поршня в крайних положениях для обеспечения технологических пауз.

Для привода устройства размотки и протягивания упаковочных материалов исследована возможность использования пружинных аккумуляторов на базе кулисных механизмов. Впервые показана возможность менять быстродействия мехатронных приводов с использованием пружин с рекуперацией энергии изменением предварительной деформации пружин.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Предложенные методы конструирования систем дозирования позволяют проводить научно-обоснованный выбор конструкций дозаторов в зависимости от свойств продукта, заданных погрешностях дозирования и требуемой производительности:

- для условий пищевых и фармацевтических предприятий предложен ряд объемных дозаторов сыпучих продуктов с закрытыми мерными объемом с одновременной загрузкой одного или несколько пакетов;

- для проектирования устройства дозирования даны рекомендации по избранию их главных характеристик, разработаны алгоритмы расчета основных конструктивных размеров дозаторов;

- разработанные новые виды дозаторов реализованы в виде экспериментальных образцов, некоторые из них использованы в ООО «Аквамир»;

- разработана идеология проектирования универсального дозатора сыпучих продуктов с предложенным способом получения номинальной дозы последовательным многократным дозированием единичных доз;

- разработана мехатронная система дозирования малыми дозами с массой меньше 5г;

- разработан универсальный дозатор для малых предприятий, перекрывающий диапазон дозирования от 50 мл до 1000 мл.

#### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались в СПбПУ в высшей школе автоматизации и робототехники, на международной конференции «Современное машиностроение. Наука и образование» в 2017 и 2018 годах, на международной конференции «Проблемы механики современных машин материалы 7-ой международной научной конференции», на международной конференции «6-th international BAPT conference “POWER TRANSMISSIONS 2019”» (Болгария), а также на международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбПУ» в 2017 и 2018 годах.

#### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 22 работы, из них 3 статьи опубликованы в международных журналах индексируемых в реферативной базе Scopus, 5 работ опубликовано в журналах, рекомендуемых ВАК, получено 3 патента РФ на изобретения, на рассмотрении в Роспатенте находятся ещё 3 заявки.

#### **Представление научного доклада: основные положения**

При научных исследованиях и при разработке фасовочно-упаковочного оборудования его надо рассматривать как единую взаимосвязанную систему характеристик обрабатываемых продуктов, требований к производительности, погрешности дозирования, удобства эксплуатации,

обеспечения санитарно-гигиенической безопасности и минимизации затрат энергии.

1. Принципы построения мехатронных автоматов целесообразно использовать как при дозировании малыми дозами, так и для системы дозирования сыпучих продуктов с массой дозы до 1 кг, используемых на малых предприятиях.

2. Математические модели в виде законов движения рабочих элементов систем дозирования, размотки и протягивания упаковочных материалов при использовании мехатронных пружинных приводов с рекуперацией энергии.

3. Методика создания систем компенсации диссипативных потерь для рассматриваемого класса приводов с использованием пневматических распределителей с электромагнитным приводом прямого действия, позволяющая упростить системы управления и снизить затраты энергии.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** изложена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, указана новизна.

**Первая глава** посвящена анализу научно-технической литературы по системе дозирования и фасования сыпучих продуктов, в том числе, по оценке погрешности и производительности дозирования. Системы дозирования и фасования сыпучих продуктов включают устройство дозирования, устройство для разматывания рулона с упаковочным материалом и протягивания его вдоль технологического тракта, устройства формирования и протягивания пакетов, системы приводов и системы управления.

Хотя известны работы, посвящённые этим системам, но отсутствуют научно-обоснованные рекомендации по выбору схем фасовочно-упаковочного оборудования, как на стадии их проектирования, так и при выборе и покупке подобного оборудования.

В данной диссертации решаются следующие научные и практические задачи:

1. поиск новых конструктивных решений для систем дозирования и фасования сыпучих продуктов малыми дозами, а также конструктивных решений для систем дозирования в пределах до 1 кг, для предприятий малого бизнеса;

2. исследование различных видов дозаторов для коммерческого дозирования, их сравнительный анализ и разработка рекомендаций по их применению;

3. разработка и исследование системы формирования и протягивания пакетов;

4. разработка принципов проектирования систем приводов, обеспечивающих снижение энергопотребления с одновременным снижением динамических нагрузок.

**Во второй главе** проведён анализ процесса дозирования сыпучих продуктов, разработана мехатронная система дозирования сыпучих продуктов для фасовочно-упаковочного оборудования, рассмотрены различные законы движения шибера, определена теоретическая производительность дозаторов, исследована погрешность дозирования и фактическая производительность дозаторов сыпучих продуктов, разработанных при работе над диссертацией.

На рисунке 1 представлена принципиальная технологическая схема процесса фасования сыпучего продукта, который состоит из следующих операций: размотка рулона и протягивание упаковочного материала вдоль технологического тракта, формирование пакета, термосваривание швов, дозирование и фасование сыпучего продукта и отрезание пакетов.

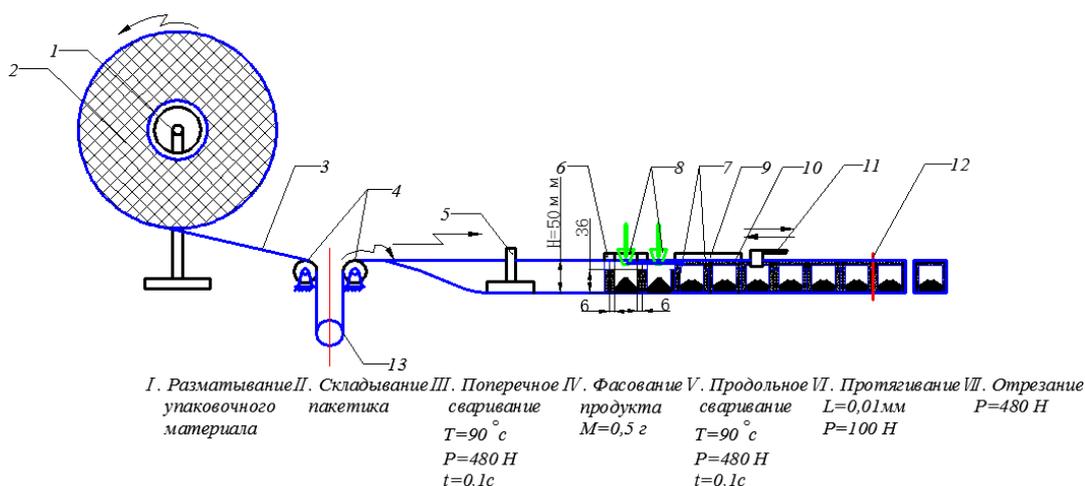


Рисунок 1 – Технологическая схема процесса фасования сыпучего продукта:

1 – опорное приспособление; 2 – рулон, 3 – упаковочный материал, 4 – ролики, 5 – устройство для складывания, 6, 9 – элементы сваривания пакетов, 7, 10 – сварные шва, 8 – сопла, 11 – устройство для протягивания, 12 – нож, 13 – блок

На рисунке 2 представлена система дозирования и фасования сыпучих продуктов малыми дозами, которая состоит из бункера с питателем, шибера дозатора типа 3-4-2, системы управления и двух датчиков: датчик

7 контролирует окончание процесса фасования, т.е. полное помещение продукта в тару, датчик 6 обеспечивает контроль уровня продукции в питателе.

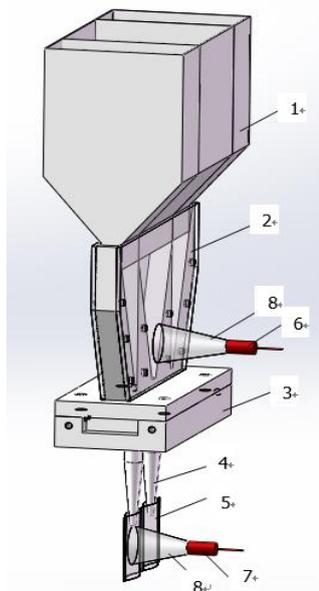


Рисунок 2 – Система дозирования и фасования сыпучих продуктов малыми дозами: 1 – бункер; 2 – питатель; 3 – шиберный дозатор; 4 – сопло; 5 – пакеты; 6 – ёмкостной датчик; 7 – датчик технического зрения; 8 – сигнальный луч

К выявленным недостаткам рассмотренных дозаторов следует отнести то, что процесс окончания дозирования происходит при заполненных продуктом двух крайних полостей (рисунок 3). Продолжение фасования приведёт к появлению пустых пакетов.

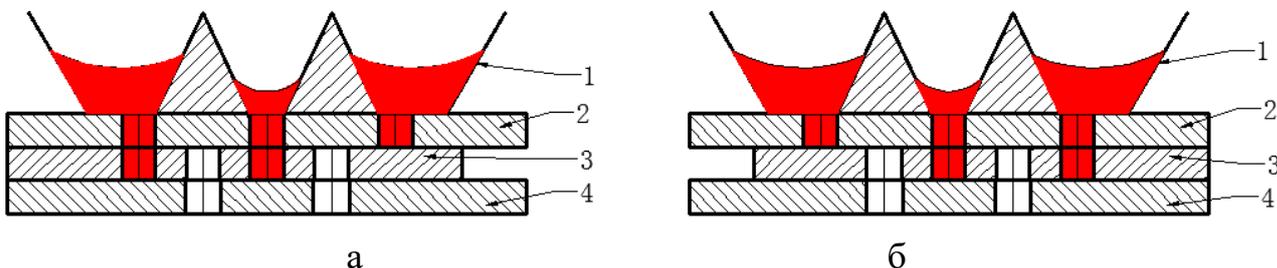


Рисунок 3 – Конфигурация шиберного дозатора в процессе окончания дозирования: а) шибер смещён влево; б) шибер смещён вправо. 1 – нижний корпус; 2 – шибер; 3 – верхний корпус; 4 – шток цилиндра

На рисунке 4 изображён дозатор типа 3-4-2, имеющий три входных отверстия, четыре закрытых мерных объёма и два выпускных отверстия. В таких конструкциях отсутствует холостой ход обеспечивает требуемую погрешность дозирования. В дозаторе регулирование дозы обеспечивается симметричным двухсторонним ограничением смещения шиберов от

нейтрального положения. На рисунке 4 показана конфигурации шибера дозатора с уменьшенной единичной дозой.

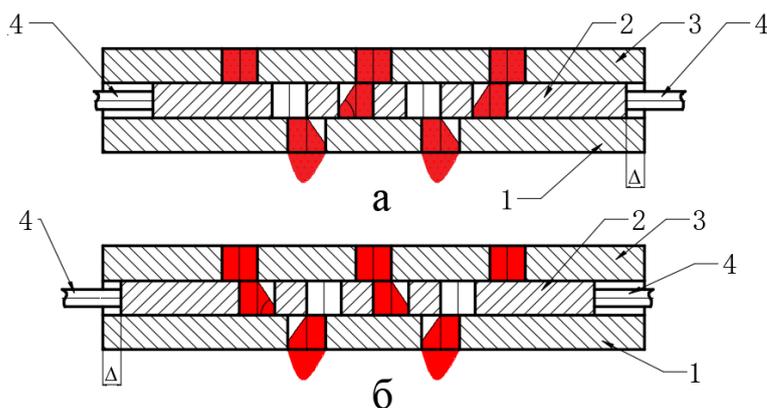


Рисунок 4 – Конфигурации шибера дозатора с уменьшенной единичной дозой: а) шибер смещён влево; б) шибер смещён вправо. 1 – нижний корпус; 2 – шибер; 3 – верхний корпус; 4 – шток привода

Для полного и равномерного опорожнения системы дозирования бункер и питатель выполнены прозрачными и разделены на три полости: центральную и две боковых. Площади поперечных сечений боковых полостей равны и сумма их площадей равна площади поперечного сечения центрального объёма.

Системой дозирования с шиберам дозатором типа 3-4-2, можно также одновременно дозировать два разных продукта. Допустим, в крайние объёмы питателя засыпана соль, а в центральный объём перец (рисунок 5). Первый и четвёртый мерный объёмы всегда наполняются из крайних объёмов питателя, а второй и третий из центрального объёма.

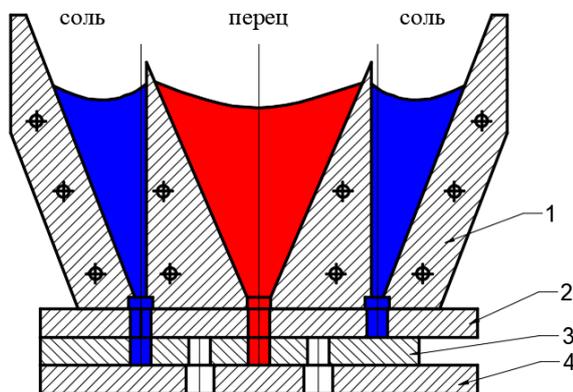


Рисунок 5 – Дозирование двух типа продуктов одновременно: 1 – питатель; 2 – верхний корпус; 3 – шибер; 4 – нижний корпус

**В третьей главе** разработан и исследован мехатронный дозатор сыпучих продуктов для малых предприятий.

При разработке дозаторов для последовательного многократного дозирования единичных масс приняты следующие положения:

1. все номинальные массы сыпучих продуктов разбиваются на несколько диапазонов;
2. в каждом диапазоне применяется только один дозатор с единичным объёмом;
3. многократное дозирование обеспечивает достижение требуемого номинального значения дозы;
4. максимальное число кратных доз, при разработке программного обеспечения, принято равным – 10, но предпочтение следует отдать 5 кратным дозам. Для сыпучих продуктов типа лекарств или биологических активных добавок, дозы, как правило, кратны 2.

Для номинальных доз в пределах 100-1000 г предложен плунжерный дозатор с минимальным регулируемым объёмом в пределах 120-250мл (рисунок 6).

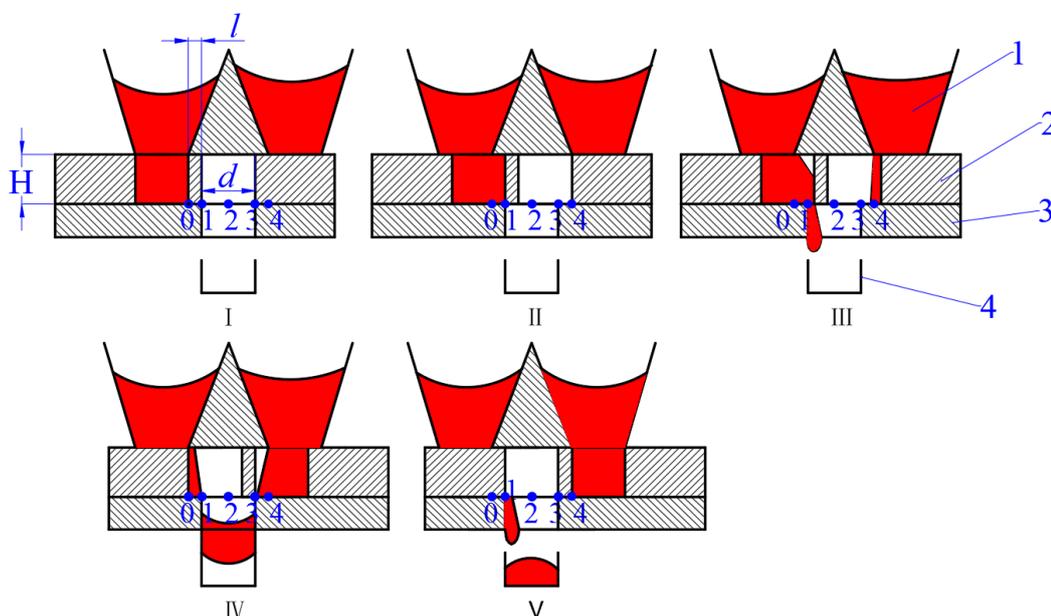


Рисунок 6 – Плунжерный дозатор: 1 – бункер, 2 – плунжер, 3 – корпус, 4 – тара

Исследование законов движения шибера или плунжера показало, что использование эллиптического закона движения шибера, увеличивает быстродействие на 10% процентов по сравнению с традиционным трапецеидальным законом. На рисунке 7 на фазовой плоскости  $\dot{x}$ ,  $x$  изображены трапецеидальный и эллиптический законы движения.

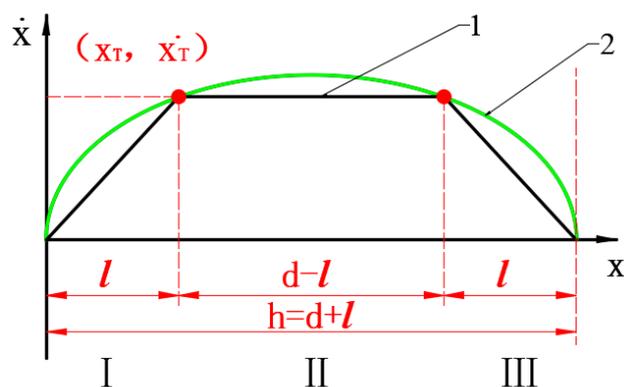


Рисунок 7 – Законы движения плунжера: 1-трапецеидальный, 2-эллиптический

Для удобства сравнения у них есть четыре общих точки, в которых значения скоростей совпадают.

Выражение для определения максимальной скорости в среднем положении:  $\dot{x}_{\max} = \frac{\dot{x}_t \cdot x_{\max}}{\sqrt{x_{\max}^2 - x_t^2}}$ ,

где  $x_{\max} = \frac{d+l}{2}$ ,  $x_t = x_{\max} - l$ ;

$d$  - ширина мерного объёма;

$l$  - расстояние между мерными объёмами;

$\dot{x}_t$  - скорость шибера при совпадении кромок мерных объёмов и выпускных отверстий.

Предложены дозаторы с двукратным уменьшением единичной массы, которые могут использоваться на предприятиях малого бизнеса и получением любых значений номинальных доз, получаемых многократным дозированием единичных доз. Для получения приемлемой производительности целесообразно использовать пятикратное дозирование.

Расчётные теоретические значения отклонений номинальных доз, полученных пятикратным дозированием единичной дозы, представлены на рисунке 8.

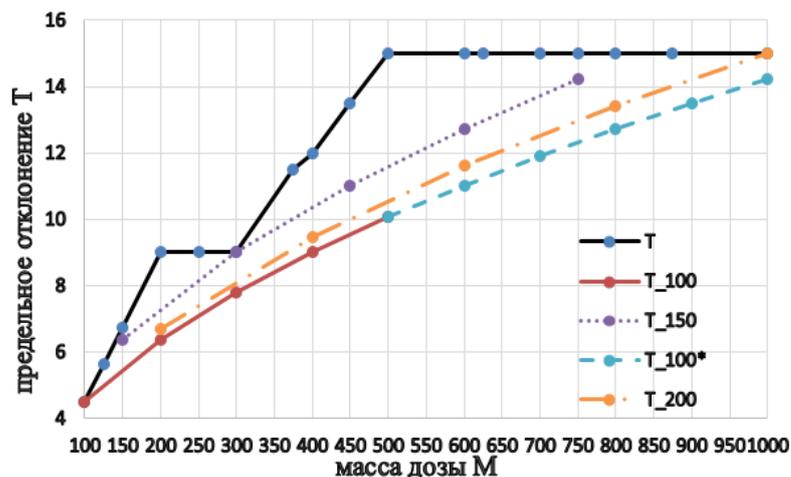


Рисунок 8 – Графики изменения отрицательных отклонений номинальной массы

Выполнены экспериментальные исследования разработанных дозаторов по определению фактических погрешностей дозирования и их сравнения с допускаемыми стандартными отклонениями. Определены максимальные значения производительности исследуемых дозаторов.

**В четвертой главе** представлены разработанные устройства для размотки, складывания и протягивания упаковочного материала.

На рисунке 9 представлено два варианта установки рулона на опорное устройство: Устройство на рисунке 9 б более универсально, так как на него можно устанавливать рулоны с диаметром внутреннего отверстия намного больше наружного диаметра опорного устройства.

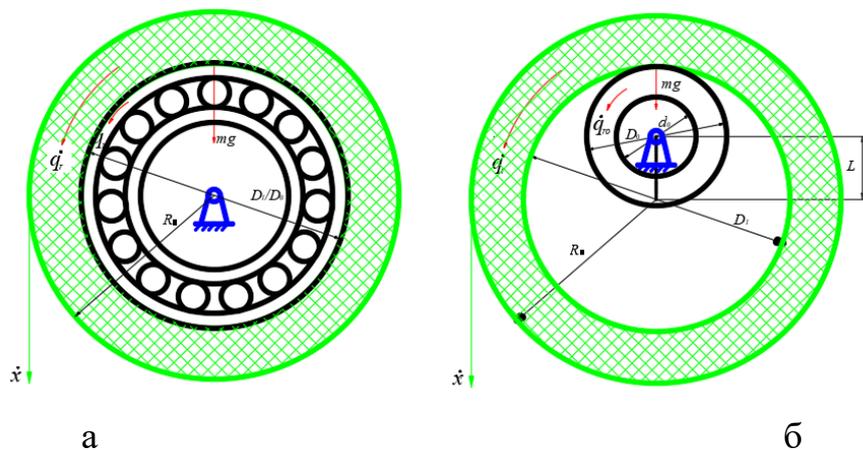


Рисунок 9 – Варианты установки рулона на опорное устройство

Равенство кинетических энергий вращающегося рулона  $T_p$  и поступательно движущейся приведённой массы  $T_{mnp}$ :

$$T = \frac{J\dot{q} \cdot 2}{2}, T_{mnp} = 0,5 \cdot m_{np} \cdot \dot{x}$$

где  $\dot{q}$  - угловая скорость рулона;

$\dot{x}$  - скорость звена выходного привода для протягивания упаковочного материала.

Момент трения в опоре:  $M_{\text{оп}} = 0,5 \cdot m_T \cdot g \cdot f \cdot d$ .

Работа трения при свободном скольжении рулона до полной остановки равна:  $A = 0,5 \cdot m_T f_{\text{пр}} \cdot d \cdot q$ .

Выражение для определения угла поворота рулона  $q$  до полной остановки:  $q = \frac{\dot{x}_{\text{max}}^2}{2gdf_{\text{пр}}}$ .

что позволяет определить длину сматываемого материала:

$$L = q \cdot R_T = \frac{\dot{x}_{\text{max}}^2}{2gdf_{\text{пр}}} \cdot R_T$$

Рулон свободно установлен на вращающуюся опору, а его угол поворота при свободном выбеге равен  $q = \frac{\dot{x}_{\text{max}}^2}{2gdf_{\text{пр}}} \cdot \frac{D}{d}$ .

На рисунке 10 изображена геометрическая модель устройства для складывания упаковочного материала, позволяющая определить расстояния между сопрягаемыми после упаковочного материала точками на выходе горизонтальной щели и входе в вертикальную щель. Начало системы координат лежит в вертикальной плоскости, проходящей через горизонтальную щель, и смещено вниз от горизонтальной щели на расстояние  $B/2$ . Минимальное расстояние  $s$  между щелями лежит в горизонтальной плоскости, проходящей через горизонтальную щель.

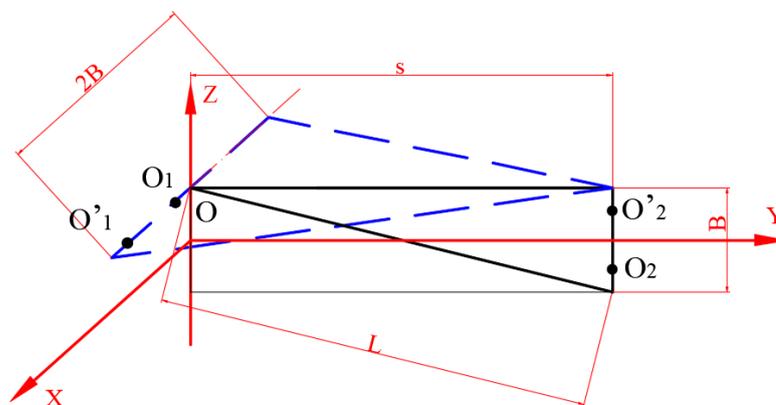


Рисунок 10 – Геометрическая модель устройства для складывания упаковочного материала

Расстояние  $L$  между любыми точками в трёхмерном пространстве, определяется следующим уравнением:

$$L^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2.$$

Приняв значение  $L$  заданным, и учитывая то, что имеется определённая зависимость между координатой  $x_1$  и координатой  $z_2 = \frac{B}{2} - x_1$ , расстояние  $L$  примет вид эллипса:  $\frac{y^2}{L^2 - \frac{B^2}{2}} + \frac{z^2}{\frac{1}{2}(L^2 - \frac{B^2}{2})} = 1$ .

**В пятой главе** исследована и разработана система приводов, предложен и исследован мехатронный пружинный привод для протягивания упаковочного материала.

На рисунке 11 представлена схема мехатронного пружинного привода с рекуперацией энергии дозатора сыпучих продуктов, реализованная с использованием двух пневматических распределителей с прямым электромагнитным управлением. Для обеспечения санитарно-гигиенической обработки применён ручной запорный распределитель.

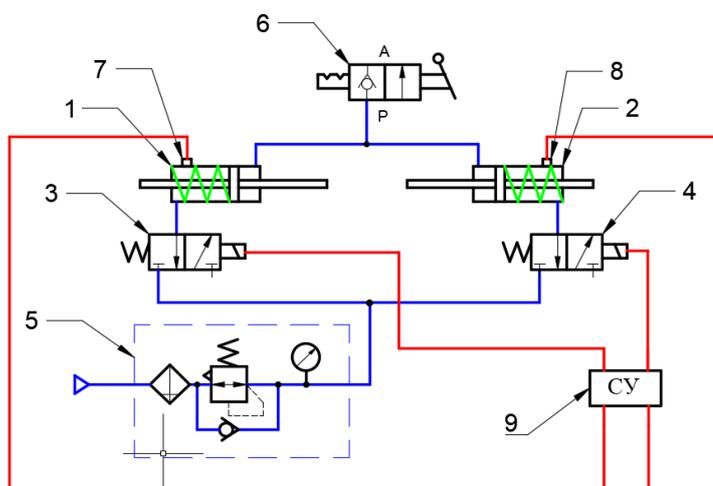


Рисунок 11 – Пневматическая схема мехатронного привода дозатора: 1, 2 – пневмоцилиндры с двухсторонним штоком, 3, 4 – пневмораспределитель-3/2, 5 – регулятор с обратным клапаном и манометром, 6 – ручной запорный распределитель, 7, 8 – датчики положения, 9 – система управления

Привод представляет собой колебательную систему с регулируемым выстоем, период колебания  $T$  определяется выражения:  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{2c}}$ , а время перемещения  $t=0,5T$ .

где  $m$  – масса шибера или плунжера плюс масса перемещаемых доз;

$T$  – период колебаний;

$c$  – жёсткость пружины.

Величина давления сжатого воздуха, подаваемого в рабочие полости цилиндров определяется из уравнения:  $P = F_k / (0,8 \cdot D^2)$ .

Работа, затрачиваемая на преодоление диссипативных потерь в пневматическом цилиндре определяется из выражения:  $A=0,2 \cdot F_k \cdot 2 \cdot x_{\max}$

Эффективная потенциальная энергия  $U_{\text{эф}}$  определяется из выражения:

$$U_{\text{эф}} = U_{\max} - U_{\min} = \frac{1}{2} (F_k^2 - F_H^2) / c$$

Величину диссипативных потерь в пружинах на внутреннее трение в пружинах, в первом приближении, можно определить из выражения:

$$A_{\text{д.л}} = 0,2 U_{\text{эф}}$$

Для учета сил компенсации и диссипативных потерь, уравнение полной механической энергии имеет вид:

$$U_{\max} - U_T + F_{\text{ц}} \cdot (x_{\max} - x_T) - A_{\text{дТ}} - F_{\text{ТР}} \cdot x_T = T_k$$

В уравнении:  $F_{\text{ц}} \cdot (x_{\max} - x_T) - A_{\text{дТ}} - F_{\text{ТР}} \cdot x_T = 0$ , точному расчётному определению не поддаются потери и сила трения в шибере или плунжере. С другой стороны, нецелесообразно добиваться нулевой скорости при установке на упор.

Пружинный аккумулятор, представленный на рисунке 12 состоит из пружины сжатия 3, кулисного камня 4, в котором перемещается кулиса 5, шарнирно соединённая с ползуном 2,двигающимся по направляющей 1. Кулиса 5 снабжена регулировочной гайкой 6, предназначенную для регулирования предварительного сжатия. В среднем положении ползуна, пружина 3 имеет предварительное сжатие  $s_1$ , скорость деформации пружины равна нулю, а скорость ползуна 2 максимальна.

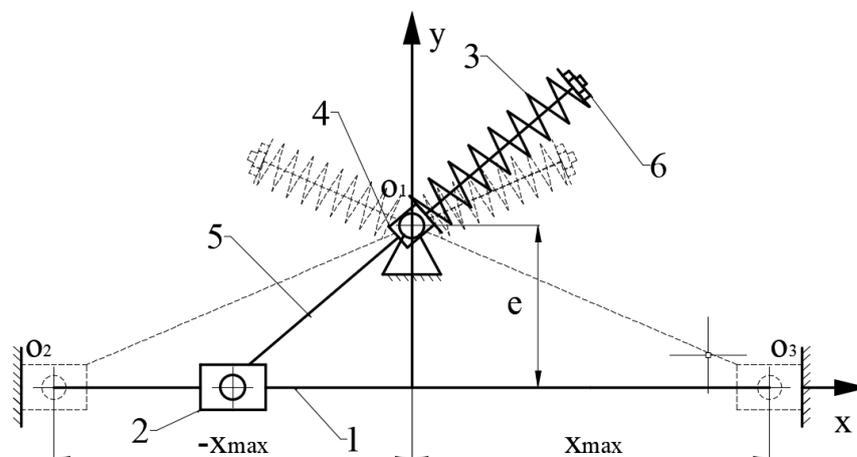


Рисунок 12 – Нелинейный пружинный аккумулятор с поступательной парой: 1 – направляющий, 2 – каретка, 3 – пружина, 4 – кулисный камень, 5 – кулиса, 6 – регулировочная гайка

Время перемещения на расстояние  $S$  определяется из выражения:

$$t = \sqrt{2m} \int_0^S \frac{dx}{\sqrt{U_{\max} - U_{\min}}} = K_{te} \sqrt{\frac{m}{c}}$$

где,  $K_{te}$  - безразмерный коэффициент, получаемый из выражения:

$$K_{te} = \int_{-1}^1 \frac{d\bar{x}}{\sqrt{(\sqrt{1+\bar{e}^2}-\bar{e}+\bar{s}_1)^2 - (\sqrt{\bar{x}^2+\bar{e}^2}-\bar{e}+\bar{s}_1)^2}},$$

где,  $\bar{e} = e/x_{\max}$ ,  $\bar{x} = x/x_{\max}$ ,  $\bar{s}_1 = s/x_{\max}$ .

На рисунке 13 даны графики изменения коэффициента  $K_{te}$  в зависимости от параметров  $\bar{e}$  и  $\bar{s}_1$ .

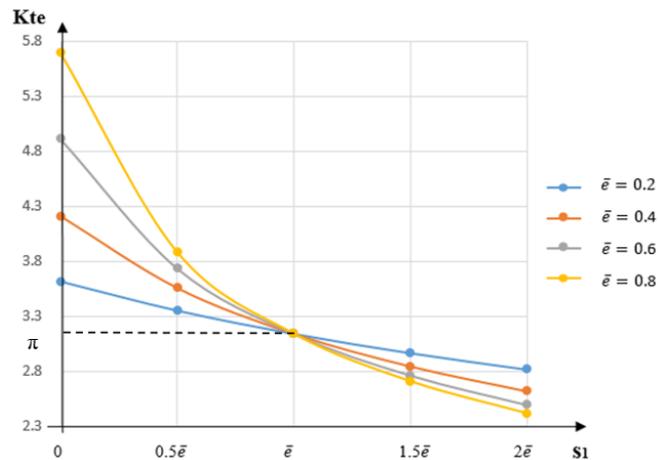


Рисунок 13 – Графики изменения коэффициентов  $K_{te}$

Из графиков видно, что все кривые пересекаются в одной точке  $e = s_1$ , где коэффициент  $K_{te}$  равен  $\pi$ . При  $s_1$  больше  $e$  коэффициент  $K_{te}$  меньше  $\pi$ . Следовательно, можно изменять время перемещения в меньшую сторону, увеличивая предварительное натяжение пружины  $s_1$  и уменьшая конструктивный параметр  $e$ .

Работа на компенсацию диссипативных потерь на внутреннее трение в пружинах  $A_{d1}$  определяется из выражения:  $A_{d1} = \varphi U_э$ .

где,  $\varphi$  - коэффициент потерь в пружине на внутреннее трение, его можно принимать равным  $\varphi = 0,1$ .

Работа на компенсацию диссипативных потерь в направляющих от массы каретки  $A_{d2}$  определяется из выражения:  $A_{d2} = 2mgfx_{\max}$ .

где,  $f$  – коэффициент трения скольжения или приведенный коэффициент трения при использовании направляющих качения.

Работа на компенсацию диссипативных потерь в направляющих каретки от усилия пружины  $A_{d3}$  определяется следующим уравнением:

$$A_{d3} = \frac{2m \cdot x_{\max}^2 \cdot f}{t^2} \cdot K_{aеп},$$

где,  $K_{aеп}$  - коэффициент потерь от трения в каретке, определяемый усилием пружины,  $K_{aеп} = K_{te}^2 \bar{e} \cdot (1 - (\bar{e} - \bar{s}_1) \cdot \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \bar{e}^2}}{\bar{e}})$ .

Работа на компенсацию диссипативных потерь в шарнирных соединениях  $A_{d4}$ , определяется следующим выражением:  $A_{d4} = \frac{2m \cdot x_{max}^2 \cdot f}{t^2} \cdot K_{aеп}^2$ ,

где,  $K_{aеп} = d \cdot K_{te}^2 \cdot \bar{e} \cdot (\ln \frac{1 + \sqrt{1 + \bar{e}^2}}{\bar{e}} - (\bar{e} - \bar{s}_1) \cdot \text{arctg} \frac{1}{\bar{e}})$ ;

$a, d$  - диаметр оси шарнирных соединений.

В режиме холостого хода, без учёта диссипативных потерь, связь между координатой положения каретки и её скоростью, на рисунке 14 расположена ниже оси  $x$  (Эллиптическая кривая чёрного цвета). Максимальная скорость выходного звена привода определяется из уравнения:  $\dot{x}_{max} = \frac{\pi \cdot x_{max}}{t}$ .

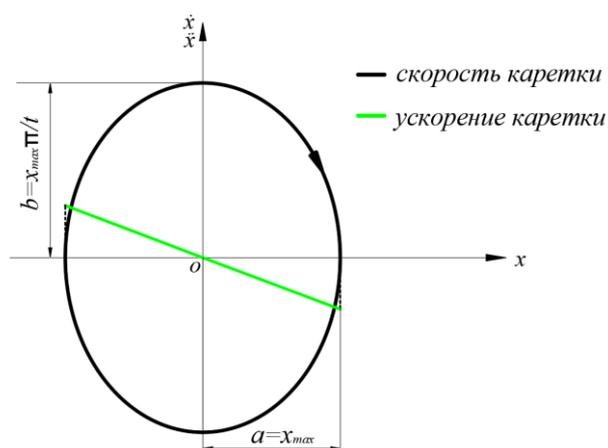


Рисунок 14 – Графики скорости и ускорения выходного звена мехатронного пружинного привода с рекуперацией энергии

### Объекты, (предмет) и методы исследования

Объект исследования – мехатронные автоматы для дозирования и фасования сыпучих продуктов.

Предмет исследования – геометрические и динамические характеристики процесса дозирования и формирования пакетов; геометрические, силовые и динамические характеристики пружинных аккумуляторов для нелинейных пружинных приводов с рекуперацией энергии, применяемых в фасовочно-упаковочном оборудовании.

При решении поставленных задач использованы методы теоретической механики, теории механизмов и машин, роботов и мехатронных систем и математического компьютерного моделирования с использованием Mathcad.

## **Результаты и их обсуждение**

Исследована и разработана система дозирования и фасования сыпучих продуктов.

Обосновано применение многократного последовательного дозирования для получения заданных номинальных масс с одновременным обеспечением допустимых погрешностей дозирования. Разработано четыре типа дозаторов для легкосыпучих продуктов, перекрывающих диапазон номинальных масс от 0,5г. до 1000г. Разработанное программное обеспечение позволяет получать различные массы дозы.

Разработана методика определения зависимости производительности от геометрических характеристики плунжера и мерных объемов.

Разработано устройство для размотки, складывания и протягивания упаковочного материала.

Исследование устройства для складывания упаковочного материала показало, что при использовании двух щелевого устройства, в котором щели расположены ортогонально друг к другу, удаётся упростить конструкцию и также уменьшить осевой габарит и обеспечить равномерное натяжение упаковочного материала, если складывающая щель выполнена по эллипсу.

Разработано устройство для регулирования массы дозы с использованием талрепа. Возможно регулирование массы дозы в ручном режиме. В случае использования системы со статистическим управлением возможна установка, например, шагового привода для программного изменения средней массы настройки. Для использования этого устройства в приводе дозатора должны использоваться пневматические цилиндры с двухсторонними штоками.

Разработана пневматическая система для системы дозирования и размотки и протягивания упаковочных материалов, благодаря которой эффективно повышается производительность и уменьшаются затраты энергии.

Разработаны и исследованы мехатронные пружинные приводы с рекуперацией энергии, в которых компенсация диссипативных потерь обеспечивается подачей сжатого воздуха низкого давления через пневматические распределители с прямым электромагнитным управлением в рабочие полости пневматических цилиндров с возвратными пружинами, что позволяет снизить стоимость проектирования и затраты энергии.

## **Заключение**

В данной работе выполнено исследование технологического процесса фасования сыпучих продуктов: шибера дозатора и устройства для разматывания, складывания и протягивания упаковочного материала.

Разработаны методы проектирования систем дозирования, при заданных погрешностях дозирования и производительности.

Разработана идеология проектирования универсального дозатора сыпучих продуктов с предложенным способом получения номинальной дозы последовательным многократным дозированием единичных доз.

Выполнена разработка технологического процесса дозирования и фасования и структуры фасовочно-упаковочного автомата, обеспечивающего максимальную производительность.

Разработаны мехатронные пружинные приводы с рекуперацией энергии.

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

#### **Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК**

1. Жавнер В.Л., Чжао В., Дозирование сыпучих продуктов малыми дозами массой 0,2-5 грамм, Вестник Международной академии холода. 2018. № 2. С. 34-41.
2. Жавнер М.В., Янь Чуаньчао., Чжао В., Мехатронные рекуперативные приводы для шаговых перемещений на базе пневматических цилиндров с возвратными пружинами, Вестник Международной академии холода. 2019. № 2. С. 22-28.
3. Чжао В., Жавнер М.В., Жавнер В.Л., Универсальные дозаторы для малых предприятий пищевой промышленности. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2019. № 2 (40). С. 19-26.
4. Чжао В., Жавнер В.Л., Смирнов А.Б., Янь Ч., Применение пневматических цилиндров с возвратными пружинами в мехатронных рекуперативных приводах, Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 111-123.
5. В. Л. Жавнер, Вэнь Чжао, Лун У, Исследования мехатронного устройства для размотки и протягивания рулонных материалов в дискретном режиме, Технологии мехатроники и робототехники, Приборостроение, 2020. № 4, с 322-329.

### **Публикации в других изданиях**

#### **В международных журналах, индексируемых в реферативной базе Scopus:**

1. Victor L. Zhavner, Zhao Wen, Chuanchao Yan and Long Wu, Research and Development of a Spring Drive with Recovery Energy in the Presence of a Variable Inertial Load // Advances in Mechanical Engineering Selected Contributions from the Conference “Modern Engineering: Science and Education”, Saint Petersburg, Russia, June 2019. p. 209-220.
2. V. L. Zhavner, Zhao Wen, Research of the Mechatron System of Dosing of Loose Products in Small Doses, Special Issue on "Explorations in Mechanical Engineering and Education" (EMEE 2020), Vol 14, No 2 (2020), p133-138.
3. Valentina P. Belogur, Victor L. Zhavner, Milana V. Zhavner, and Wen Zhao, Development and Research of Mechatronic Spring Drives with Energy Recovery for Rod Depth Pumps // Advances in Mechanical Engineering Selected Contributions from the Conference “Modern Engineering: Science and Education”, Saint Petersburg, Russia, June 2020. P. 38-51.

#### **Полученные патенты на изобретения:**

1. Патент РФ. № 2742446 от 06.07.2020, Мехатронный пружинный привод, Жавнер Виктор Леонидович, RU, Чжао Вэнь, CN, Янь Чуаньчао, CN.
2. Патент РФ. № 2741187 от 29.10.2020, Привод скважинного штангового насоса, Белогур Валентина Павловна, RU, Жавнер Виктор Леонидович, RU, Жавнер Милана Викторовна, RU, Чжао Вэнь, CN.
3. Патент РФ. № 2741139 от 07.09.2020, Способ формования упаковочного материала, Жавнер Виктор Леонидович, RU, Чжао Вэнь, CN.

#### **Учебные пособия:**

1. В. Л. Жавнер, Чжао Вэнь, М. В. Жавнер, Янь Чуаньчао, Мехатронные системы в фасовочно-упаковочном оборудовании: учеб. Пособие – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 80с.
2. В. Л. Жавнер, О. Н. Мацко, М. В. Жавнер, Чжао Вэнь, Мехатронные пружинные приводы с рекуперацией энергии в технологическом оборудовании: учеб. Пособие – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 77с.

#### **В других изданиях:**

1. Жавнер В.Л., Чжао В., Применение пневматических двигателей для компенсации диссипативных потерь в пружинных приводах с рекуперацией энергии, в сборнике: Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития.

Сборник научных трудов международной научно-технической конференции. 2018. С. 307-316.

2. Жавнер В.Л., Чжао В., Мехатронные принципы проектирования систем дозирования сыпучих продуктов малыми дозами, в сборнике: Проблемы механики современных машин материалы vii международной научной конференции. Улан-Удэ, 2018. С. 52-56.

3. Жавнер В.Л., Чжао В., Исследование мехатронной системы дозирования сыпучих продуктов малыми дозами, Современное машиностроение. Наука и образование. 2018. № 7. С. 410-419.

4. Жавнер В.Л., Чжао В., Мехатронная система дозирования сыпучих продуктов малыми дозами, Современное машиностроение. Наука и образование. 2017. № 6. С. 462-470.

5. Жавнер В.Л., Чжао В., Янь Чуаньчао, У Лун, Мехатронные рекуперативные приводы для возвратно-поступательных перемещений на базе пневматических цилиндров с возвратными пружинами, Современное машиностроение. Наука и образование. 2019. № 4. С. 476-486.

6. Чжао Вэнь. Жавнер В.Л. Обеспечение требований стандартов к количеству фасованной продукции в потребительской таре М.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017. – часть 2, 17 с.

7. В. П. Белогур, В. Л. Жавнер, М. В. Жавнер, Ч. Вэнь, Разработка и исследование мехатронных пружинных приводов с рекуперацией энергии для штанговых глубинных насосов, Современное машиностроение. Наука и образование. – 2020. – № 9. – С. 312-332. – DOI 10.1872/MMF-2020-22.

8. Zhao Wen, Zhavner Victor Leonidovich, The use of pneumatic cylinders with a return spring to compensate for balance losses in mechanical regenerative drives for reciprocating movements, 6-th international BAPT conference “POWER TRANSMISSIONS 2019” 2019 VARNA, vol. 1, p 107-112.

9. Yan Chuanchao, Zhao Wen, The use of pneumatic cylinders with return springs when creating mechanical drives with recuperative energy, 6-th international BAPT conference “POWER TRANSMISSIONS 2019” 2019 VARNA, vol. 1, p 163-167.

Аспирант \_\_\_\_\_ ФИО

(подпись)