

На правах рукописи



РЕДЧЕНКО МАРИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ  
СВЕКЛОВИЧНОГО ЖОМА И ПОЛУЧЕНИЕ ИЗ НЕГО ПИЩЕВЫХ  
ВОЛОКОН**

Специальность: 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном  
учреждении высшего образования  
«Пензенский государственный технологический университет»

- Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор  
**Авроров Валерий Александрович**
- Официальные оппоненты: – **Алексеев Геннадий Валентинович**, доктор  
технических наук, профессор, федеральное  
государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Национальный  
исследовательский университет ИТМО», факультет  
пищевых биотехнологий и инженерии, профессор
- **Фатыхов Юрий Адгамович**,  
доктор технических наук, профессор, федеральное  
государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Калининградский  
государственный технический университет»,  
заведующий кафедрой «Пищевые и холодильные  
машины»
- Ведущая организации: – федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

Защита состоится «4 » июня 2020 г. в 13<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета  
Д 212.196.07 на базе федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Российский экономический университет имени Г.В.  
Плеханова» по адресу: 117997, Москва, Стремянный пер., д. 36., ауд. 353.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в Научно-информационном  
библиотечном центре им. академика Л.И. Абалкина ФГБОУ ВО «Российский  
экономический университет имени Г.В. Плеханова» по адресу: 117997, г. Москва, ул.  
Зацепа, д. 43 и на сайте организации: <http://ords.rea.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор химических наук, профессор

Чалых Татьяна Ивановна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** При производстве сахара сахарные заводы РФ перерабатывают ежегодно более 40 млн.т. свеклы. При этом основным видом отходов, помимо ботвы, мелассы, фильтрационного остатка, является свежий свекловичный жом, составляющий 70...90% от массы перерабатываемой свеклы.

Свекловичный жом по содержанию полезных веществ относится к ценным вторичным материальным ресурсам и его целесообразно использовать: при производстве сушеного жома с применением различных минеральных добавок, для получения обогащенного мелассой, молочной сывороткой и другими компонентами силоса, при производстве пектина, пищевых волокон, биогаза, биоэтанола и др.

Несмотря на изобилие и относительно невысокую стоимость свекловичного жома, пектиносодержащие комплексы, как и пектин, в Российской Федерации в промышленных масштабах практически не производятся, что сдерживает выпуск профилактических биологически активных добавок и продуктов функционального назначения на их основе. Свекловичный пектин, входящий в состав волокон, по своим физико-химическим свойствам является природным адсорбентом по отношению к тяжелым металлам, радионуклидам, остаточным пестицидам и по этому показателю относится к незаменимым веществам в производстве пищевых продуктов функционального назначения.

Ежегодная потребность в пищевых волокнах по разным данным для отечественной пищевой промышленности и общественного питания составляет 1,2...1,5 млн. т. В настоящее время производимая пищевая продукция способна удовлетворить потребность населения в пищевых волокнах лишь на 30-35%.

Поэтому создание промышленных технологий получения пищевых свекловичных волокон из жома и широкое использование их в производстве продуктов функционального назначения является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы.** Вопросам процесса прессования продуктов сахарного производства посвящены исследования А.Н. Степанова, Ф.А. Демчинского, И.Ф. Зеликмана и других исследователей. В работах этих авторов определены факторы, наиболее сильно влияющие на плотность и другие показатели прессования рафинадной кашки. В развитие теории получения диффузионного сока из свекольной стружки, на которой базируется данная работа, существенный вклад внесли ученые П.М. Силин, В.В. Спичак, И.Ф. Бугаенко, А.А. Славянский, А.С. Кирпичев, С.С. Кутетеладзе и др.

Вопросам, посвященным производству и использованию пищевых волокон, посвящены работы следующих отечественных исследователей: В.А. Лосевой, В.А. Колесникова, Т.Ю. Кокиной, В.В. Прянишникова и др.

Перспективным направлением использования свекловичных волокон является их применение в виде добавки при производстве различной пищевой продукции повышенной биологической ценности. По заключению ВНИИ мясной промышленности производство вареных колбас, рубленых полуфабрикатов, пельменей может использовать пищевые свекловичные волокна с сохранением вкусовых достоинств продукции и увеличением ее биологической ценности. При этом гидратированные волокна заменяют до 10 % мясного сырья. Пищевые свекловичные волокна также могут найти широкое применение в молочной промышленности при выпуске творожных паст и кисломолочных напитков, в

кондитерской промышленности при производстве конфетных масс, при производстве хлебобулочных изделий, особенно профилактического назначения.

Однако сегодня свекловичный жом в недостаточной степени используется в качестве вторичного материального ресурса и большей частью идет в утилизируемые отходы, загрязняя окружающую среду.

Работа проводилась в соответствии с договором № 31140ГУ/2017 от 10.05.2017 с Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям) и планом НИОКР ПензГТУ в 2016-2019 гг.

**Цель исследований** - совершенствование процесса компактирования свежего свекловичного жома и разработка с его использованием конструктивно-технологических схем поточных линий для получения пищевых волокон.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработать научно-технические решения по совершенствованию процесса компактирования свежего свекловичного жома и его дальнейшего использования в качестве сырья для производства пищевых волокон, в том числе:

- исследовать процесс прессования свежего свекловичного жома и прессовое оборудование;

- разработать компоновки компакторов для удаления влаги из свежего свекловичного жома.

2. Разработать и исследовать модели процесса обезвоживания свежего свекловичного жома, в том числе:

- разработать и исследовать модели движения влагосодержащей жомовой массы в зоне шнекового движителя компактора, ее уплотнения в межвитковом пространстве шнека и влагоотделения через перфорированную вставку, окружающую шнек;

- предложить и исследовать научно-техническое решение, способствующее интенсификации процесса обезвоживания в компакторе со шнековым движителем;

- выявить зависимости, влияющие на степень влагоотделения из свежего свекловичного жома при его прессовании в компакторе (величину осевого давления, пропускную способность перфорированной вставки, окружающей конический шнек компактора, величину прогиба многолепестковой диафрагмы от давления жома, выходящего из шнекового движителя, степень уплотнения жома и др.).

3. Экспериментально исследовать изменение физико-механических показателей жома при его компактировании, в том числе:

- изменения эффективной вязкости жома в зависимости от скорости деформации при его прессовании в компакторе;

- изменения осевого давления в зависимости от площади выходного отверстия компактора и изменения количества отжимаемой жидкости от величины осевого давления.

4. Обосновать и разработать варианты рациональных конструктивно-технологических схем поточных линий для производства пищевых волокон из свежего, сухого и гранулированного жома.

5. Оценить экономическую эффективность производства из жома пищевых волокон.

**Объект исследований** – процесс обработки свежего свекловичного жома.

**Предмет исследований** – конструктивные и режимные параметры оборудования поточной линии для производства пищевых волокон из свекловичного жома.

### **Научная новизна:**

1. Предложено научно-техническое решение процесса двухэтапного компактирования свежего влагосодержащего свекловичного жома, реализуемого в последовательном непрерывном режиме. В соответствии с предложенным научно-техническим решением разработана и обоснована компоновка вертикального компактора с коническим шнековым движителем, имеющим переменный шаг витков и уменьшающиеся углы их наклона, окруженном перфорированной конической вставкой для удаления отжимаемой влаги, отличающаяся от известных моделей тем, что предложено дополнительное прессующее устройство, представляющее собой много лепестковую диафрагму, содержащую консолюно закрепленные на кольцевом основании отдельные плоские упругие лепестки. Конструкция компактора позволяет увеличить степень извлечения влаги из жома в 1,5 раза.

2. Разработаны и теоретически исследованы модели процесса обезвоживания свежего свекловичного жома в предложенном и разработанном образце компактора. Получены аналитические зависимости, позволяющие определить значения сил, действующих на частицу жома при ее движении по виткам конического шнека компактора в зависимости от переменного радиуса его витков. Установлена зависимость изменения давления на отжимаемую жомовую массу, оказываемую витками конического шнека, и ее давления на стенки перфорированной вставки по всей высоте зоны отжима, определена пропускная способность и скорость истечения жидкой фракции через отверстия вставки, окружающей шнек. Получено выражение, позволяющее определить степень уплотнения жома в зоне конического шнекового движителя и зоне многолепестковой упругой диафрагмы. Аналитическим путем установлена зависимость величины прогиба лепестков диафрагмы от величины давления, оказываемым жомом, выходящим из шнекового движителя компактора.

3. На действующей модели компактора выявлено влияние скорости деформации при прессовании жома в компакторе на его эффективную вязкость. Получены эмпирические зависимости, характеризующие изменение эффективной вязкости прессуемого жома. Выявлено влияние изменения величины осевого давления на жом, оказываемого шнековым движителем в зависимости от площади сечения выходного отверстия компактора и на количество отжимаемой влаги.

4. Предложены рациональные по критерию ресурсосбережения машино-аппаратурные схемы трех вариантов поточных линий для получения пищевых волокон из свежего, высушенного или гранулированного жома и технические решения по устройствам для замачивания, промывки и отбеливания жома. Показано, что разработанные варианты исполнений поточных линий для получения пищевых волокон и предложенные конструктивно-технологические решения оборудования по замачиванию, промывке и обработке жома перекисью водорода в совокупности с выбранным энергосберегающим оборудованием для аэродинамической подачи высушенного или гранулированного жома и сушки пищевых волокон, в т.ч. с использованием направленного ИК-излучения, позволяют снизить энергопотребление по сравнению с базовым вариантом в 2,7 раза (для высушенного и гранулированного жома) и в 3,3 раза (для свежего жома).

### **Практическая значимость результатов работы.**

1. Разработана новая конструкция компактора для прессования свежего свекловичного жома.

2. Разработаны конструктивно-технологические схемы поточных линий для получения пищевых волокон из свежего, высушенного и гранулированного жома,

позволяющие снизить энергозатраты при их производстве и являющиеся основой для выполнения проектов цехов по переработке жома в пищевые волокна.

3. Предложены новые технические решения установок для вихревого замачивания и перемешивания жома, его непрерывной конвейерной промывки и отбеливания раствором перекиси водорода.

4. Приведена методика расчета конструктивно-технологических параметров оборудования предложенных поточных линий.

5. Результаты проведенных исследований и научно-инженерных расчетов используются в учебном процессе по направлениям подготовки 15.03.02 – Технологические машины и оборудование, 19.03.02 – Продукты питания из растительного сырья и 19.03.04 – Технология продуктов общественного питания.

**Методология и методы исследования.** Теоретические и экспериментальные исследования проводились с использованием материальных средств лабораторной базы ПензГТУ в соответствии с принятой научной методологией. Для решения задач использовался математический аппарат физики, методы механики сплошных сред, векторной алгебры, численные методы, методы математического моделирования, дифференциальное и интегральное исчисление. Обработка результатов экспериментов осуществлялась с применением методов математической статистики с помощью программных средств.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Результаты аналитического исследования процесса компактирования свежего свекловичного жома.

2. Научно-техническое решение процесса компактирования свекловичного жома и его аппаратное оформление.

3. Методика расчета технологических, кинематических и конструктивных параметров компактора.

4. Результаты исследования зависимости физико-механических показателей свекловичного жома от условий его прессования.

5. Научно-технические решения по интенсификации процессов обработки свежего, высушенного и гранулированного жома и их аппаратное оформление.

6. Результаты разработки вариантов машино-аппаратурных схем поточных линий для получения пищевых волокон из свежего, высушенного и гранулированного жома.

7. Результаты оценки эффективности производства пищевых волокон из свекловичного жома.

**Степень достоверности и апробация работы.** Достоверность результатов работы подтверждена согласованностью и непротиворечивостью с выводами ранее проведенных исследований и экспериментальной проверкой.

Основные положения работы доложены и обсуждены на ежегодных международных научно-практических конференциях «Пищевая промышленность и агропромышленный комплекс: достижения, проблемы, перспективы», (Пенза, Пензенский дом знаний, 2015-2019 гг.); ежегодных вузовских научно-практических конференциях «Современные технологии и оборудование пищевых производств и общественного питания» (Пенза, ПензГТУ, 2016-2018г.); XX международной научно-практической конференции «Современные технологии и оборудование пищевых производств» (Барнаул, АлтГТУ, 2019); XVI международной научной конференции «Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК» (Брянск, БГСХА, 2019).

Основные положения и результаты исследований представлялись и обсуждались на Фестивале науки ПензГТУ «Научный салон» 19.10.2017 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 8 - в рецензируемых научных изданиях (3 статьи опубликованы без соавторов), 1 статья индексируется в базе данных Scopus. Общий объем опубликованных работ составляет 5,74 п.л., из которых автору принадлежит 2,89 п. л.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, 5 разделов, общих выводов, списка литературы из 188 наименований и приложений на 51 странице. Работа включает 176 страниц машинописного текста, содержит 50 рисунков и 26 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследований по переработке свекловичного жома, являющегося основным видом отходов и ценным вторичным материальным ресурсом, сформулированы научная новизна и практическая значимость выполненных исследований, а также выносимые на защиту результаты.

**В первом разделе «Анализ технологии и оборудования для переработки отходов свеклосахарного производства»** проведен анализ состояния отрасли переработки отходов свеклосахарного производства, техники и технологии первичной обработки свежего свекловичного жома. Рассмотрены технологические схемы получения из жома пектиносодержащих комплексов, используемых в пищевой и других отраслях промышленности.

По результатам проведенного анализа обоснован выбор объекта и предмета исследования, сформулирована его цель и задачи диссертационной работы, определены методы их решения.

**Во втором разделе «Аналитические исследования процесса компактирования свежего свекловичного жома»** разработаны модели движения жомовой массы в зоне шнекового движителя, ее уплотнения и влагоотделения; взаимодействия жома с лепестками упругой многолепестковой диафрагмы, установленной на выходе компактора.

При моделировании перемещения жомовой массы по  $i$ -му витку вертикально установленного конического шнека использовалась уравнение движения частицы жома под действием приложенных к ней сил:

$$\sum \bar{F}_i - \frac{d(mv)}{dt} = [\bar{F}_{mp.1} + \bar{F}_{mp.2} + \bar{G} + F_m + \bar{F}_{ц.нсп.} + \bar{F}_{ц.отн.} + \bar{F}_{ин.акс.} + \bar{F}_k] - \frac{d(mv)}{dt} = 0 \quad (1)$$

где  $\bar{F}_{mp.1}$  – сила трения частицы о поверхность витка, Н;  $\bar{F}_{mp.2}$  – сила трения частицы о поверхность вставки, Н;  $\bar{G}$  – сила тяжести частицы, Н;  $\bar{F}_{ц.нсп.}$  – центробежная сила инерции частицы в переносном движении, Н;  $\bar{F}_{ц.отн.}$  – центробежная сила инерции частицы в относительном движении, Н;  $\bar{F}_{ин.акс.}$  – аксиальная сила инерции, Н;  $\bar{F}_k$  – сила Кориолиса, Н;  $m$  – масса частицы, кг;  $v$  – абсолютная скорость частицы, м/с.

В проекциях на оси координат уравнение (1), учитывая, что частота вращения шнека  $\omega = \text{const}$ , может быть представлено в виде

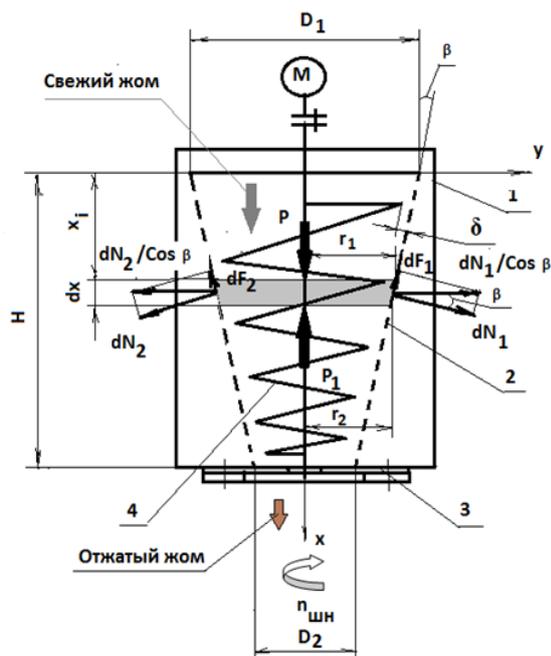
$$\begin{cases} m\omega_{шн}^2 R_i - N_2 - 2mR_i\omega_{шн}v\cos\beta = 0 \\ mR_i\omega^2 + N_1(\sin\alpha_i - f_1\cos\alpha_i) = 0, \\ N_1\cos\alpha_i - mg = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где  $\omega_{шн}$  – угловая частота вращения шнека, с<sup>-1</sup>;  $R_i$  – радиус витка шнека, м;  $N_2$  – сила реакции со стороны вставки, Н;  $v$  – скорость движения частицы, м/с;  $\beta$  – угол

между векторами абсолютной и переносной скоростями частицы, град;  $\omega$  — угловая частота вращения частицы,  $c^{-1}$ ;  $N_1$  — сила реакции от поверхности витка, Н;  $\alpha_i$  — угол наклона витка, град;  $f_1$  — коэффициент трения между материалом частицы и поверхностью витка.

Из этой системы определены значения сил, действующих на частицу жом в зоне ее движения по виткам шнека в зависимости от переменного радиуса  $R_i$  витка.

Для установления аналитической зависимости характера изменения осевого давления жом по высоте шнека рассмотрели модель движения элемента жом в шнековой зоне и его взаимодействие со стенкой конической перфорированной вставки (рис.1). При перемещении жом в зоне шнека, кроме действующих на него осевых усилий, будут возникать боковые усилия на стенку вставки.



- 1 – корпус компактора,
- 2 – перфорированная вставка,
- 3 – многолепестковая упругая диафрагма,
- 4 – конический шнек

Рисунок 1 – Силы, действующие на выделенный элемент жом в зоне шнека

На выделенный элемент жом действуют следующие силы:

– сила осевого давления  $p$  от витка шнека, с поверхностью  $S_1$  которого контактирует выделенный элемент, Н

$$P = p s_1 = p \cdot \pi r_1^2, \quad (4)$$

где  $r_1$  – радиус окружности верхнего основания элемента, м;

– сила реакции, Н

$$P_1 = (P + dP) s_2 = (p + dp) \pi r_2^2, \quad (5)$$

где  $S_2$  – площадь нижнего основания элемента,  $m^2$ ;  $r_2$  – радиус окружности нижнего основания элемента, м;

– силы нормального давления на стенку вставки от боковой поверхности, элемента, Н

$$dN_1 = dN_2 = kp \cos \beta ds_3, \quad (6)$$

Внутренние стенки перфорированной вставки будут испытывать давление со стороны перемещаемого жом, и его величина может быть выражена как

$$q = kp, \quad (3)$$

где  $p$  – величина осевого давления на материал, Па;  $k$  – коэффициент, учитывающий долю осевого давления жомовой массы передаваемого на стенки перфорированной вставки. Величина бокового давления принимается в пределах от 40 до 60% от величины осевого давления.

Для определения зависимости, характеризующей изменение давления по высоте шнековой зоны, рассмотрели модель движения элементарного слоя жом высотой  $dx$ , находящегося на расстоянии  $x_i$  от начала координат. Этот элемент является усеченным конусом с верхним диаметром  $d_1$  и нижним  $d_2$  и высотой  $dx$ .

где  $ds_3$  – площадь боковой поверхности элемента, м;

– силы трения между материалом и стенкой вставки, Н

$$dF = fkp ds_3, \quad (7)$$

где  $f$  – коэффициент трения между жомом и материалом перфорированной вставки;

– сила тяжести, Н

$$G = mg = \rho Vg = \rho g \frac{(ds_1 + \sqrt{ds_1 ds_2 + ds_2})}{3} dx, \quad (8)$$

где  $\rho$  – плотность жома, кг/м<sup>3</sup>;  $s_1$  – площадь верхнего основания выделенного элемента, м<sup>2</sup>;  $V$  – объем выделенного элемента (усеченного конуса), м<sup>3</sup>;  $h = dx$ , м.

Дифференциальное уравнение равновесия элемента под действием приложенных сил относительно оси  $x$

$$\begin{aligned} P - P_1 + dN - dF + G = 0 \text{ или} \\ p \cdot \pi r_1^2 - (p + dp)\pi r_2^2 + kp \cos \beta ds_3 - fkp ds_3 + \\ + \rho g \frac{(ds_1 + \sqrt{ds_1 ds_2 + ds_2})}{3} dx = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Если  $dx \rightarrow 0$ , то выделенный элемент с допустимой погрешностью можно считать круговым цилиндром с одинаковыми диаметрами оснований  $d_1 = d_2$ . В этом случае  $dN_1 = dN_2 = kp ds$  и  $dF_1 = dF_2 = fkp ds$ , где  $ds$  – площадь новой боковой поверхности элемента, м<sup>2</sup>.

В этом случае уравнение (9) запишется как

$$p \cdot \pi r_1^2 - (p + dp)\pi r_2^2 + kp ds - fkp ds + \pi r_1^2 \rho g dx = 0. \quad (10)$$

Решение уравнения (10) при  $x = H$

$$p = \exp(-\theta H) + m, \quad (11)$$

где  $H$  – высота перфорированной вставки, м;  $\theta = \frac{2fk(r_1 - r_2)}{\pi r_1^2}$ ,  $m$  – масса жома в

шнековом пространстве, кг;  $r_2$  – радиус вала шнека, м.

Величина давления на жомовую массу по высоте конического шнекового движителя изменяется по экспоненциальной зависимости и определяется конструктивными параметрами шнека, характеризующими условия продвижения жомовой массы.

Коэффициент уплотнения жома в межвитковом пространстве может быть выражен через отношение максимального и минимального шага витков шнека.

$$K_{\text{упл.}} = S_{\text{max}}/S_{\text{min}}, \quad (12)$$

где  $K_{\text{упл.}}$  – показатель уплотнения жомовой массы;  $S_{\text{max}}$ ,  $S_{\text{min}}$  – максимальный и минимальный шаг между витками, м.

Осевое давление, развиваемое шнеком, Па

$$p_{\text{ос}} = \frac{F_{\text{ос}}}{s_n} K_{\text{упл.}}, \quad (13)$$

где  $s_n$  – площадь, занимаемая жомом, находящимся на последнем витке шнека, м<sup>2</sup>.

Пропускная способность перфорированной вставки, кг/с

$$Q = F_0 v_0 \rho \varphi, \quad (14)$$

где  $F_0 = \frac{\pi d_0^2 z_0}{4}$  – суммарная площадь отверстий в перфорированной вставке, м<sup>2</sup>;  $z_0$  – число отверстий в вставке.

Скорость течения жидкой фракции через отверстия вставки, м/с

$$v_0 = \frac{\pi n}{60} (r_H + r_{BH}) k_B t g \beta_n, \quad (15)$$

где  $r_H, r_{BH}$  – наружный и внутренний радиусы последнего витка шнека, м;  $k_B$  – коэффициент объемной подачи жидкой фракции (0,34...0,4);  $\beta_n$  – угол наклона последнего витка шнека.

Полученные зависимости позволяют определить параметры удаления жидкой фракции через перфорированную вставку при прессовании свекловичного жома в зоне шнека.

Многолепестковая упругая диафрагма компактора предназначена для дополнительного влагоотделения и содержит ряд отдельных плоских пружинящих лепестков, закрепленных на кольцевом основании корпуса компактора под коническим шнеком.

Для определения прогиба единичного лепестка диафрагмы в зависимости от величины давления, оказываемого выходящим из шнека жомом, использовался метод Ритца.

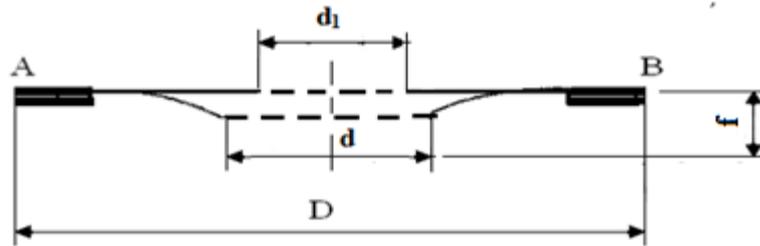


Рисунок 2 – Схема прогиба диафрагмы от давления жома, подаваемого шнеком  
Величина прогиба, м

$$f = \frac{2qa^3}{EI\pi^4} \left( \sin \frac{\pi}{a} z - \frac{1}{81} \sin \frac{3\pi}{a} z \right) \quad (16)$$

при величине изгибающего момента, Нм

$$M = \frac{2q \cdot a}{\pi^2} \left( \sin \frac{\pi a}{z} - \frac{1}{9} \sin \frac{3\pi}{a} z \right), \quad (17)$$

где  $E$  – модуль упругости материала, МПа;  $I$  – момент инерции, м<sup>4</sup>,  $I = 0,05d^4(1-c)^4$ ,  $c = d_1/d$ .

Перед прессованием объем промежутков между частицами дисперсной фазы (свекловичной стружки) в процентах от общего занимаемого свекловичным жомом объема может быть выражен как

$$\gamma = \frac{V_0 - V_c}{V_0} \cdot 100\%, \quad (18)$$

где  $\gamma$  – показатель пористости жома, %;  $V_0$  – начальный объем жома, м<sup>3</sup>;  $V_c$  – объем дисперсной фазы (свекловичной стружки) в жоме, м<sup>3</sup>.

Степень уплотнения жома при его прессовании в компакторе является суперпозицией двух последовательных стадий уплотнения: сначала в зоне конического шнека  $\beta_1$ , затем в зоне входа в многолепестковую пружинную диафрагму  $\beta_2$ .

$$\beta = \beta_1 + \beta_2. \quad (19)$$

Для первой стадии уплотнения в зоне шнека  $\beta_1 \frac{V_0 - V_{ш}}{V_0}$ , где  $V_{ш}$  – объем жома на выходе из зоны шнека, м<sup>3</sup>.

Для второй стадии  $\beta_2 = \frac{V_{ш}-V_k}{V_{ш}}$ , где  $V_k$  – объем жома на выходе из диафрагмы компактора, м<sup>3</sup>.

Отсюда степень уплотнения жома в компакторе

$$\beta = \frac{V_0 - V_{ш}}{V_0} + \frac{V_{ш} - V_k}{V_{ш}}, \quad (20)$$

Поскольку масса жома в процессе прессования остается неизменной, можно записать  $\frac{\rho_k}{\rho_0} = \frac{V_0}{V_k}$ , где  $\rho_0$  – начальная плотность жома, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_k$  – плотность жома на выходе из компактора, кг/м<sup>3</sup>. Откуда  $\rho_k = \frac{\rho_0}{1-\beta}$ .

Полученные аналитические зависимости использованы для определения размерных и режимных характеристик компактора и его действующей модели.

**В третьем разделе «Разработка компоновки компактора и конструктивно-технологических схем линий для производства пищевых волокон из свекловичного жома»** разработаны с учетом ограничительных требований с помощью метода структурно-координатного кодирования варианты компоновок компакторов с горизонтальным, наклонным и вертикальным расположением шнекового движителя, составлены технологическая и параметрическая схемы процесса компактирования жома, разработаны конструктивно-технологические схемы ресурсосберегающих поточных линий производства пищевых волокон из свежего, сухого или гранулированного жома.

Получены новые технические решения установок для замачивания сухого жома, его промывания и отбеливания перекисью водорода, выбраны энергосберегающие конструкции высокопроизводительных сушильных установок.

По результатам синтеза и анализа вариантов компоновок компактора по динамическим, конструктивным и технологическим показателям обоснована и принята для дальнейшей проработки схема с вертикальным расположением конического шнека с переменным шагом между витками и углами их наклона. Данная компоновка обеспечивает по сравнению с горизонтальным и наклонным расположением шнеков лучшие условия для влагоотделения, наибольшую жесткость конструкции при минимальных ее габаритах и занимаемой площади. На рисунке 3 приведена схема координатных движений звеньев компактора с вертикальным расположением шнека.

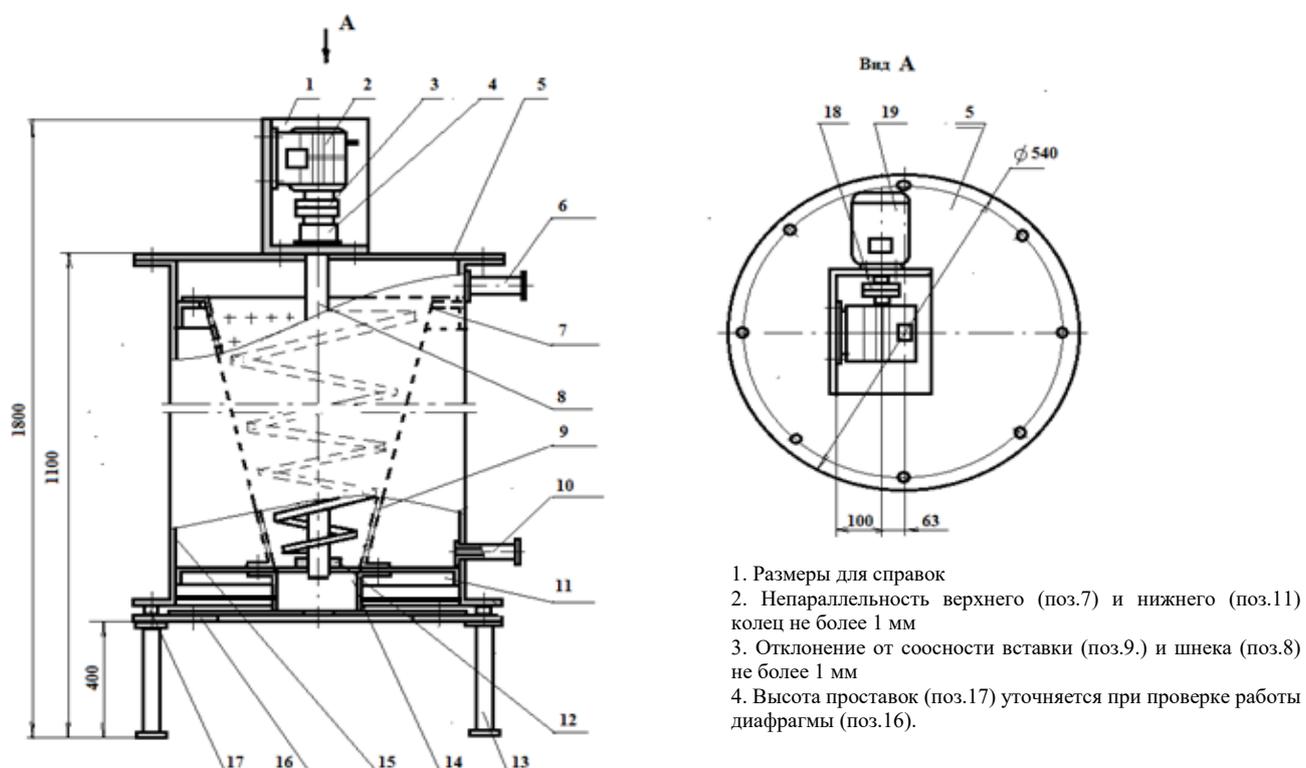


1 – конический шнек, 2 – многолепестковая диафрагма, 3 – корпус, 4 – перфорированная вставка, 5 – редуктор

Рисунок 3 – Схема координатных движений звеньев компактора с вертикальным расположением шнека

Шнек 1 по всей его высоте окружен вставкой 4 установленной с минимальным зазором соосно со шнеком, через отверстия которой жидкая фракция из прессуемого свежего жома поступает в корпус 3 компактора. На выходе продукта из шнековой зоны в корпусе компактора установлена многолепестковая упругая диафрагма 2, оказывающая дополнительное сопротивление продвижению жома и увеличивающая количество отделяемой из него влаги за счет возрастания давления. Подача жома и удаление жидкой фракции из компактора осуществляется по трубопроводам с помощью кулачкового и центробежного насосов. Общий вид разработанной компоновки компактора приведен на рисунке 4.

Предварительная оценка пропускной способности компактора и скорости движения жома при заданной длине шнека 750 мм, диаметрах витков 360 и 160 мм и шаге между витками от 65 до 90 мм показывает, что теоретическая пропускная способность может составить 0,9 кг/с при скорости осевого перемещения жома 0,026 м/с.



1. Размеры для справок
2. Непараллельность верхнего (поз.7) и нижнего (поз.11) колец не более 1 мм
3. Отклонение от соосности вставки (поз.9.) и шнека (поз.8) не более 1 мм
4. Высота проставок (поз.17) уточняется при проверке работы диафрагмы (поз.16).

- 1 – кронштейн, 2 – редуктор червячный, 3 – муфта втулочно-пальцевая,
- 4 – корпус подшипника, 5 – крышка верхняя, 6 - трубопровод верхний,
- 7 – кольцо верхнее, 8 – шнек конический, 9 – вставка перфорированная,
- 10 – трубопровод нижний, 11 – кольцо нижнее, 12 – подшипник нижний,
- 13 – подставка, 14 – вставка, 15 – корпус компактора, 16 – диафрагма многолепестковая, 17 – втулка опорная, 18 – муфта втулочно-пальцевая,
- 19 - электродвигатель

Рисунок 4 – Общий вид компоновки компактора

Проведенный анализ известных линий для производства пищевых волокон из сухого гранулированного жома и входящего в них оборудования показал, что имеются критические точки, оказывающие наиболее существенное влияние на производительность линии и качественные показатели готовой продукции. Это, прежде всего, относится к оборудованию для предварительного замачивания,

промывания, компактирования, отбеливания и сушки, которое с позиций энергопотребления и интенсификации процесса обработки жома требует поиска новых более рациональных решений.

В связи с этим были решены следующие задачи:

– рационализация системы для приема, хранения и транспортирования сырья к технологическому оборудованию (для варианта использования в линии свежего или сухого жома) за счет использования пневмоустановок нагнетающего или всасывающего действия;

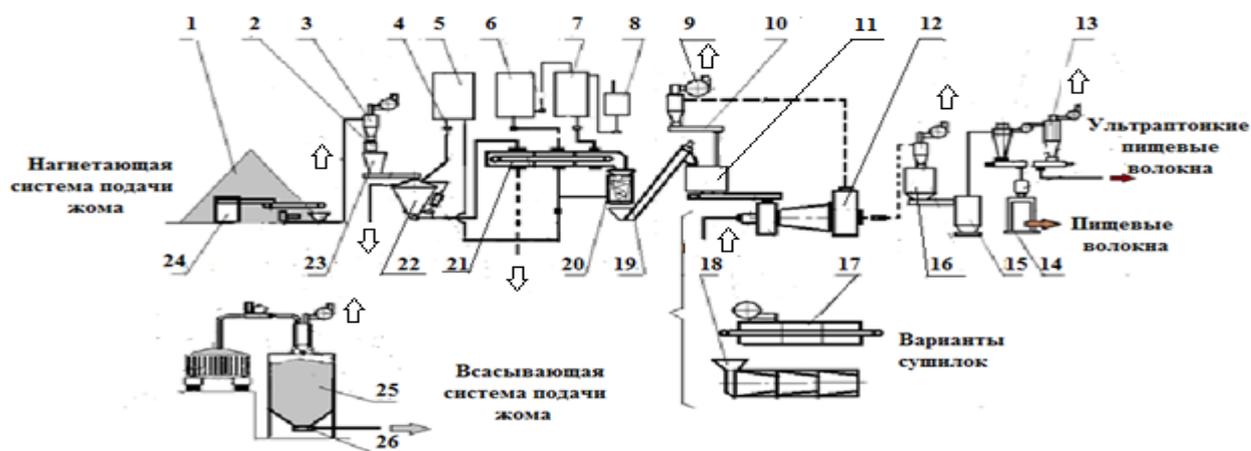
– разработка варианта конструктивно-технологической схемы реактора для замачивания гранулированного или сухого жома с тангенциальной подачей воды и ее подогревом;

– разработка схемы конвейерного секционного устройства для промывки и отбеливания жома с форсуночной подачей жидкостей;

– обоснование и выбор для сушки пищевых волокон энергосберегающих сушильных установок;

– разработка вариантов исполнения машино-аппаратурных схем линий.

На рисунках 5 и 6 приведены разработанные схемы поточных линий для получения пищевых волокон из сухого, гранулированного или свежего влагосодержащего жома, а также технические решения по устройствам для замачивания, промывки и отбеливания жома.

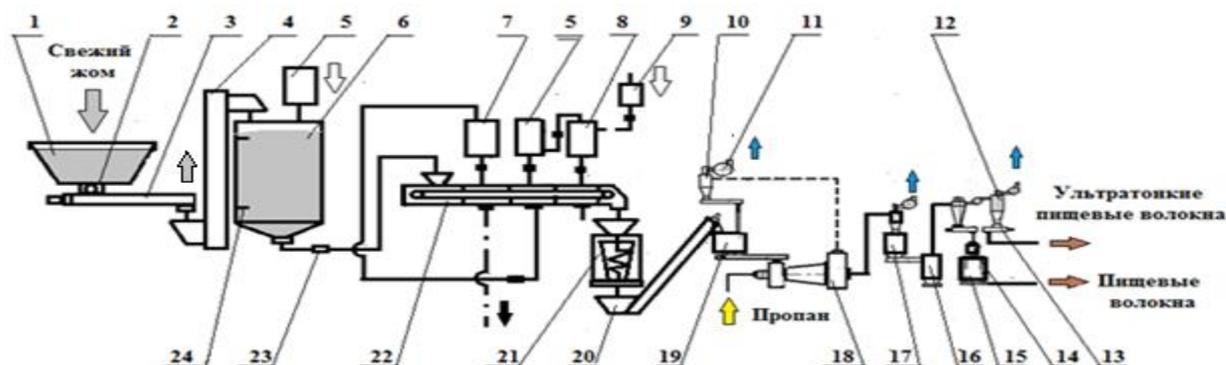


- 1 – борт сухого жома, 2 – измельчитель гранул (устанавливается для гранулированного жома), 3 – циклон-разгрузитель, 4 – насос кулачковый, 5 – танк оборотной воды, 6 – танк чистой воды, 7 – танк с 3% раствором перекиси водорода, 8 – танк с 37% раствором перекиси водорода, 9 – вентилятор центробежный, 10 – питатель шнековый, 11 – дозатор многовальный, 12 – газовая барабанная сушилка СБТ-3000, 13 – фильтр рукавный, 13 – фильтр рукавный, 14 – станция упаковки пищевых волокон, 15 – мельница, 16 – вибропитатель мельницы, 17 – туннельная секционная сушилка с направленным подводом ИК излучения, 18 – модульная барабанная сушилка с направленным подводом ИК излучения, 19 – конвейер винтовой, 20 – компактор жома шнековый с многолепестковой диафрагмой, 21 – ленточный промыватель жома, 22 – танк-замачиватель жома, 23 – бункер-дозатор, 24 – транспортер подачи жома, 25 – силос, 26 – затвор шлюзовой.

Рисунок 5 – Схема поточной линии для получения пищевых волокон из сухого или гранулированного жома

В данном варианте компоновки применены следующие новые конструктивно-технологические решения:

- танк-замачиватель жома (поз.22), обеспечивающий интенсивную циркуляцию суспензии за счет ее тангенциального движения и подогрева;
- трехсекционный ленточный промыватель жома (поз.21), обеспечивающий равномерное распределение промываемого слоя жома на ленте транспортера, интенсивное форсуночное распыление воды и перекиси водорода;
- вертикальный шнековый компактор с коническим шнеком и многолепестковой упругой диафрагмой (поз.20), позволяющий осуществлять эффективный отжим промытого жома перед его сушкой.



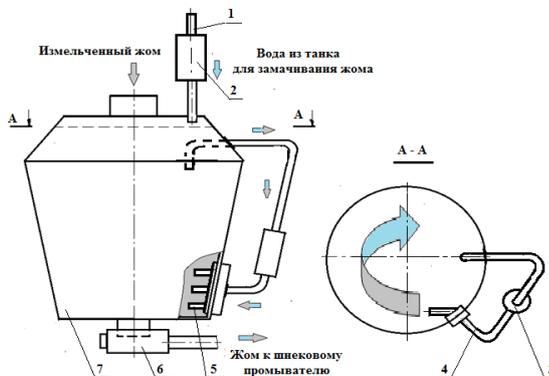
1 – приемный бункер; 2,3, 13 – шнековый питатель, 4 – нория, 5 – танк чистой воды, 6 – силос, 7 – танк с водой первой промывки, 8 - танк с 3-ех% раствором перекиси водорода, 9 - танк с 37-и% раствором перекиси водорода, 10 – циклон-разгрузитель, 11 – центробежный вентилятор, 12 – рукавный фильтр, 14 – бункер-накопитель, 15 - станция упаковки с ленточным транспортером, 16 – мельница, 17 – вибропитатель мельницы, 18 - газовая барабанная сушилка СБТ -3000, 19 – дозатор многовальный, 20 – наклонный винтовой конвейер, 21 - компактор шнековый с многолепестковой диафрагмой, 22 – ленточный промыватель жома, 23 – насос кулачковый, 24 – датчик уровня

Рисунок 6 – Схема поточной линии для получения пищевых волокон из свежего жома

Свежий жом разгружается в приемный бункер 1, из которого отбирается шнековыми питателями 2 и 3, подающими жом в норию 4. Далее жом поступает в силос 6, куда добавляется чистая вода из танка 5 для получения суспензии. Уровень заполнения силоса контролируется датчиками 24. Из силоса с помощью кулачкового насоса 23 суспензия поступает в ленточный трехсекционный промыватель 22, последовательно обрабатывается чистой водой и перекисью водорода из танков 5,7,8. Из промывателя обработанный перекисью жом прессуется в вертикальном шнековом компакторе с многолепестковой упругой диафрагмой 21 и из него через наклонный винтовой питатель 20 поступает в многовальный дозатор 19, где происходит окончательное отбеливание жома. Из дозатора через шнековый питатель жом направляется в сушилку 18. После сушки высушенные пищевые волокна направляются в циклон-разгрузитель 10 и далее в вибропитатель 17 мельницы тонкого помола 16. Измельченные волокна воздушным потоком подаются в последовательно установленные циклон-разгрузитель и рукавный фильтр 12, из

которых волокна, рассортированные по гранулометрическому составу, через шнековые питатели направляются в бункер-накопитель 14 и далее на станцию упаковки 15.

На рисунке 7 приведена разработанная компоновка танка-замачивателя сухого жома с тангенциальной подачей струи воды, обеспечивающей циркуляцию суспензии жома по всему объему емкости с установкой на трубопроводе проходного подогревателя воды и центробежного насоса.

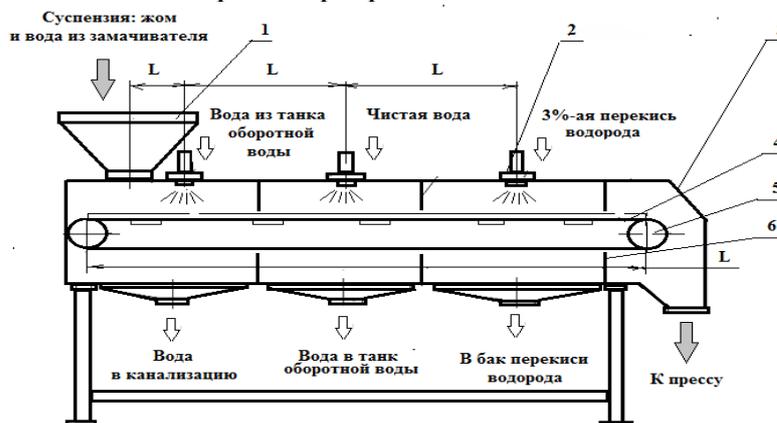


1 – трубопровод, 2 – насос кулачковый, 3 – проходной подогреватель, 4 – трубопровод циркуляционный, 5 – сопла, 6 – насос кулачковый, 7 – танк-замачиватель жома.

Рисунок 7 – Схема танка-замачивателя жома с тангенциальным движением струй воды и их подогревом

Предлагаемое решение обеспечивает интенсивное перемешивание и сокращение времени на замачивание сухого жома

На рисунке 8 показана разработанная конструктивно-технологическая схема промывателя жома с ленточным транспортером



1 – бункер для загрузки жома, 2 – форсунки, 3 – ограждение, 4 – сетчатая лента, 5 – ленточный транспортер, 6 – перегородки отсеков орошения.

Рисунок 8 – Схема установки для промывания и обработки жома перекисью водорода

Данное техническое решение обеспечивает следующие положительные результаты:

- жом распределяется равномерным слоем по всей ширине ленты и при транспортировании не уплотняется;
- разбрызгивающие устройства в виде форсунок захватывают всю ширину ленты и дают факел по всей зоне обработки;

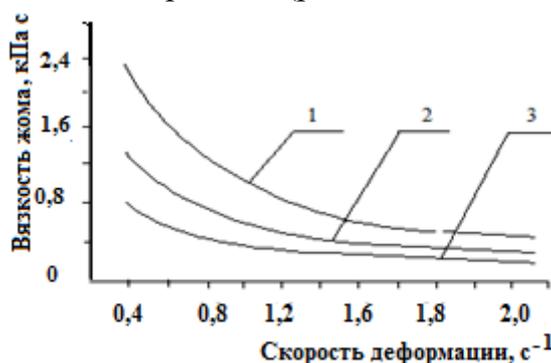
- между зонами выполнены разграничительные перегородки, не допускающие смешивания потоков подаваемых жидкостей;
- предусмотрена возможность регулирования скорости ленты в широких пределах.

**В четвертом разделе «Экспериментальные исследования процесса компактирования жома и его реологических свойств»** дано описание методики проведения испытаний действующей модели компактора, получены экспериментальные данные по изменению вязкости жома в зависимости от его влагосодержания и скорости деформации, по изменению величины осевого давления в зависимости от размеров выходного сечения и изменения количества выделяемой из жома влаги в зависимости от величины осевого давления, дана экспериментальная оценка адгезионных свойств свекловичного жома.

Для оценки степени прессования жома в действующей модели с коническим шнеком и перфорированной вставкой был проведен однофакторный эксперимент, в котором оценивалось влияние изменения площади выходного сечения на количество отделяемой от жома жидкой фракции. Изменение площади сечения выходного отверстия осуществлялось регулировочным винтом, оказывающим сопротивление прохождению жома и являющимся аналогом многолепестковой диафрагмы.

Установлено, что положение регулировочного винта, перекрывающего поперечное сечение выходного отверстия корпуса шнека, оказывает существенное влияние (с доверительной вероятностью 0,95) на степень прессования и выход жидкой фракции. Максимальная доля отпрессованной из жома влаги при перекрытом на  $\frac{3}{4}$  выходном отверстии составила  $34 \pm 2$  г. По сравнению с не перекрытым отверстием влагоотделение увеличилось в 10,7 раза.

Установлено, что изменение эффективной вязкости жома от скорости деформации зависит от его влагосодержания (рис.9).



1 – жом с содержанием влаги 70%, 2 – жом с содержанием влаги до 85%, 3 – жом с содержанием влаги 92%.

Рисунок 9 – Кривые изменения эффективной вязкости свекловичного жома в зависимости от скорости деформации

Линеаризация данных кривых путем преобразования переменных позволила получить эмпирические степенные модели:

- кривая 1:  $Y_R = 6,2975X^{-0,8213}$ ,

- кривая 2:  $Y_R = 3,1052X^{-0,7085}$ ,

- кривая 3:  $Y_R = 1,6566X^{-0,5920}$ ,

где  $Y_R$  – эффективная вязкость, МПа;  $X$  – скорость деформации, с<sup>-1</sup>.

Результаты исследования изменения величины осевого давления на жом в зависимости от площади сечения выходного отверстия компактора и его влияния на количество отжимаемой из жома жидкой фракции представлены на рисунках 10 и 11.

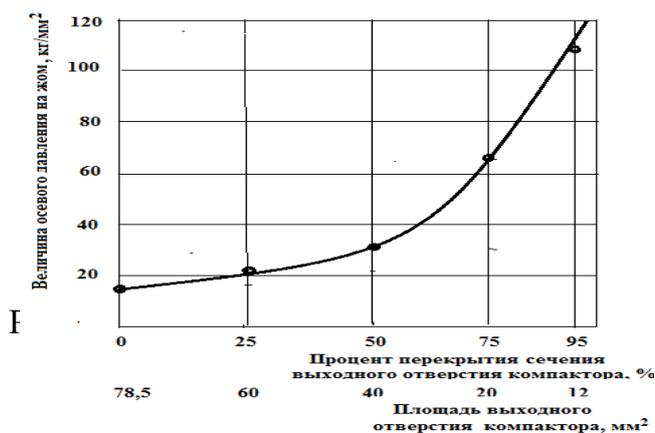


Рис. 10 – Зависимость осевого давления на жом от площади выходного отверстия компактора

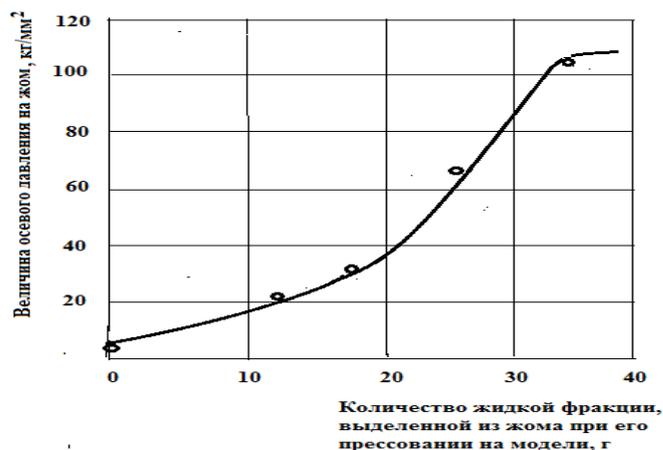


Рис. 11 – Зависимость количества отжимаемой жидкости от осевого давления на жом

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на модели, с допустимой погрешностью могут быть экстраполированы на полноразмерный экспериментальный образец компактора, так как коэффициенты геометрического подобия и конусности шнеков, как на модели, так и на компакторе одинаковы:

$$K_1 = \frac{L_{\text{шн.}}}{L_{\text{мод.}}} = \frac{500}{100} = \frac{S_{\text{шн.макс.}}}{S_{\text{мод.макс.}}} = \frac{90}{18} = \frac{S_{\text{шн.мин.}}}{S_{\text{мод.мин.}}} = \frac{65}{13} = 5;$$

$$K_2 = \frac{R_{\text{шн.макс.}} - R_{\text{шн.мин.}}}{L_{\text{шн.}}} = \frac{R_{\text{мод.макс.}} - R_{\text{мод.мин.}}}{L_{\text{мод.}}} = \frac{180 - 80}{500} = \frac{40 - 20}{100} = 0,2$$

где  $K_1$  - коэффициент подобия размеров,  $K_2$  - коэффициент подобия конусности;  $L_{\text{шн.}}$ ,  $L_{\text{мод.}}$  - рабочая длина шнеков компактора и его модели, мм;  $S_{\text{шн.}}$ ,  $S_{\text{шн.}}$  - шаг шнеков компактора и его модели, мм;  $R_{\text{шн.}}$ ,  $R_{\text{мод.}}$  радиусы витков шнеков компактора и его модели соответственно, мм.

В пятом разделе «Оценка экономической эффективности шнекового компактора жома и производства из жома пищевых волокон» дана оценка себестоимости изготовления компактора и приведены технико-экономические показатели эффективности производства пищевых волокон из свекловичного жома.

Результаты предварительной оценки эффективности производства пищевых волокон свидетельствуют, что их производство способно обеспечить получение прибыли в размере 15164,53 т.р. в год при двухсменной работе поточной линии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана конструкция вертикального компактора свежего свекловичного жома с коническим шнековым движителем и упругой многолепестковой диафрагмой, обеспечивающая непрерывный процесс прессования жома с повышенной степенью извлечения из него влаги.

Разработаны технологическая, параметрическая схемы компактора, определена его пропускная способность, разработаны эскизы базовых деталей и узлов для

экспериментального образца компактора. Разработан вариант компоновки экспериментального образца компактора.

2. Разработаны и исследованы модели условий движения жома в зоне конического шнека и многолепестковой упругой диафрагмы, на основе которых получены аналитические зависимости, характеризующие процесс влагоотделения в межвитковом пространстве шнекового движителя и в зоне дополнительного его прессования лепестками диафрагмы.

Получена модель удаления жидкой фракции через перфорированные отверстия вставки, окружающей шнек, позволяющая определить коэффициент уплотнения материала, живое сечение отверстий вставки, ее пропускную способность по влаге, скорость течения жидкой фракции и длину зоны ее активного удаления.

Получены аналитические зависимости, определяющие прогиб упругих лепестков диафрагмы от величины давления, оказываемого выходящим из шнека жомом с учетом модуля упругости материала лепестков и момента инерции.

3. Выполнен анализ физико - механических показателей свекловичного жома, обрабатываемого в компакторе. Получены зависимости изменения вязкости жома при прессовании в зависимости от скорости его деформации и влагосодержания. Показано, что наименьшее значение вязкости в зависимости от влагосодержания жома в диапазоне 70 ... 92% составляет 0,2 кПа при скорости деформации 1,8...2,0 с<sup>-1</sup>.

Установлено, что при уменьшении площади выходного отверстия действующей модели компактора на 60% с 20 до 12 мм<sup>2</sup> осевое давление на жом увеличивается с 60 до 100 кг/мм<sup>2</sup>, а количество отжимаемой из жома влаги в диапазоне давлений от 60 до 100 кг/мм<sup>2</sup> возрастает при этом на 62,5 %.

4. Разработаны варианты конструктивно-технологических схем ресурсосберегающих автоматизированных поточных линий производства пищевых волокон из свежего, высушенного или гранулированного жома.

Обоснованы и разработаны рациональные с позиций энергосбережения схемы машин для замачивания сухого или гранулированного жома и трехсекционного конвейера для его промывания и отбеливания.

5. Результаты предварительной оценки экономической эффективности производства пищевых волокон из свекловичного жома свидетельствуют о том, что ожидаемая прибыль предприятия от реализации продукции может составить 15164,53 тыс. руб. в год при двух сменной работе поточной линии.

#### **По материалам диссертации опубликованы следующие работы:**

##### **Публикации в рецензируемых научных изданиях:**

1. Польдяева, М.А. Об использовании вторичных ресурсов свеклосахарного производства / М.А. Польдяева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2016. – № 1 (29). – С. 92-94.

2. Польдяева, М.А. О технологии обработки влагосодержащих пищевых отходов / М.А. Польдяева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2016. – № 1 (29). – С. 79-84.

3. Польдяева, М.А. О компактировании свекловичного жома / М.А. Польдяева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2017. – № 2 (36). – С.20-24.

4. Редченко, М.А. О направлениях переработки и использования отходов свеклосахарной промышленности в отраслях АПК / М.А. Редченко, Е.А. Сарафанкина

// XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2019. – № 1 (45). – С.108-111.

5. Редченко, М.А. О прессовании свекловичного жома / М.А. Редченко, В.А. Авроров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс.– 2019. – № 2 (46). – С. 170-174.

6. Авроров, В.А. Моделирование процесса компактирования влагосодержащих отходов растительного происхождения на примере свежего свекловичного жома / В.А. Авроров, М.А. Редченко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс.– 2019. – № 2 (46). – С. 145-150.

7. Мурашкина, О.А. О снижении энергозатрат при сушке свекловичного жома / О.А. Мурашкина, М.А. Редченко, В.А. Авроров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2019. – № 2 (46). – С. 160-165.

8. Сарафанкина, Е.А. О совершенствовании технологии производства пектиносодержащих пищевых волокон из свекловичного жома / Е.А. Сарафанкина, Л.А. Авророва, М.А. Редченко, В.А. Авроров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2019. – № 2 (46). – С. 165-170.

#### **Публикации индексируемые в базе данных Scopus:**

9. Avrorov, V.A. A plant for mincing plastic material and other industrial wastes / V.A. Avrorov, V.V. Lovtseva, M.A. Poldyaeva, N.D. Tutov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – № 11-12. – P.746-751.

#### **Публикации в других изданиях и материалах конференций:**

10. Польшяева, М.А. О переработке вторичных влагосодержащих пищевых отходов / М.А. Польшяева, В.В. Авроров // Экологические проблемы субъектов экономики: Сборник материалов международной научно-практической конференции, 17 - 18 декабря 2015 г. – Пенза: ПензГТУ, 2015. – С. 184-188.

11. Авроров, В.А. О новой энергосберегающей технологии приготовления корма для кормления животных, птиц и рыб / Г.Д. Лузгин, Г.В. Авроров, В.В. Ловцева, М.А. Польшяева // Состояние и перспективы развития современной науки: социально-экономические, естественнонаучные исследования: сборник статей Международной научно-практической конференции, 28 – 29 апреля 2016 г. – Пенза: ПДЗ, 2016. – С.110-115.

12. Польшяева, М.А. Разработка и исследование компактора для влагосодержащих пищевых материалов/ М.А. Польшяева, В.А. Авроров // Современные информационные технологии: сборник научных трудов международной научно-технической конференции. – Пенза: ПензГТУ, 2016. – С. 113-115

13. Редченко, М.А. О сушке свекловичного жома / М.А. Редченко, В.А. Авроров // Актуальные вопросы современной науки: теория и практика научных исследований: сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции, 20 – 22 сентября 2017 г. – Пенза: ПензГТУ, 2016. – № 23. – С. 201-205.

14. Редченко, М.А. Анализ технологии получения пектина из свекловичного жома / М.А. Редченко, В.А. Авроров. // Актуальные вопросы современной науки: теория и практика научных исследований: сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции, 20 – 22 сентября 2017 г. – Пенза: ПензГТУ, 2017. – С. 224-227.

15. Редченко, М.А. О прессовании свежего свекловичного жома в компакторе со шнековым двигателем и упругой диафрагмой / М.А. Редченко, В.А. Авроров, О.А. Мурашкина, Е.А. Сарафанкина // Современные технологии и оборудование пищевых

производств: материалы XX международной научно-практической конференции, 14-15 марта 2019 г. – Барнаул: АлтГТУ, 2019. – С. 48-53.

16. Редченко, М.А. О компактировании свежего свекловичного жома на вертикальном шнековом компакторе с многолепестковой уплотняющей диафрагмой / М.А. Редченко, В.А. Авроров, О.А. Мурашкина, Е.А. Сарафанкина // Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК: сборник материалов XVI Международной научной конференции, 21 марта 2019 г. – Брянск: БГСХА, 2019. – С. 983-993.

17. Организация производства пищевых волокон из свекловичного жома в цехе мощностью 4т готового продукта в сутки [Текст]: отчет о НИР: договор № 04/05-05-17 от 21.08.2017г. / Авроров В.А., Авроров Г.В., Редченко М.А., Мурашкина О.А. – Пенза: ПензГТУ, 2017. – 118 с.

18. Разработка компактора для влагосодержащих пищевых материалов: отчет о НИР договор № 11450ГУ/2017 от 10.05.2017/ Редченко М.А. –Пенза, 2018. – 37 с.