

На правах рукописи

СЕМЕНОВ СЕРГЕЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ



**СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЁМКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ПРИГОТОВЛЕНИЯ ЗЕРНОВОЙ ПАТОКИ**

Специальность 4.3.1. «Технологии, машины и оборудование для агропромыш-
ленного комплекса»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Княгинино – 2024

Работа выполнена в Государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (ГБОУ ВО НГИЭУ)
на кафедре «Технический сервис»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Булатов Сергей Юрьевич

Официальные оппоненты: **Ведищев Сергей Михайлович**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Тамбовский государственный техниче-
ский университет», заведующий кафедрой «Аг-
роинженерия»

Солонщиков Павел Николаевич
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ
ВО «Вятский государственный агротехнологи-
ческий университет», и. о. заведующего кафедрой «Технологическое и энергетическое оборудование»

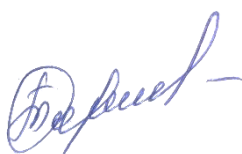
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина»

Защита состоится 24 декабря 2024 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 72.2.016.02 при ГБОУ ВО НГИЭУ по адресу: 606360, Россия, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а, аудитория 121.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГБОУ ВО НГИЭУ и на сайте <https://ngie.u.ru/>.

Автореферат разослан _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тареева Оксана Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года и Федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на период 2017–2025 гг. указывает на актуальность и важность проведения научных исследований, связанных с разработкой ресурсосберегающих технологий производства высококачественных кормов, кормовых добавок, созданию технологий переработки и хранения продукции АПК.

Пшеница, рожь и ячмень являются важными зерновыми культурами, используемыми для продовольственных, технических и кормовых целей, играют ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности и составляют основу мировой экономики.

Зерно злаковых культур, наряду с другими видами питательных веществ, содержит много крахмала, усвоение которого при кормлении животных происходит медленно, и при этом продуктивно используются только определенные формы в небольшом количестве. Усвояемость питательного потенциала крахмала не превышает 20-25% в зависимости от вида культур. Поэтому задача новых технологий переработки зерна состоит во внедрении таких способов обработки исходного сырья, которые позволили бы перевести крахмал в удобную для усвоения организмом животного форму. Это возможно при разрушении зерновой структуры крахмала на клеточном уровне, что способствует разрыву природных связей между отдельными составляющими частями и переводу его в более простые углеводы в виде декстринов и сахаров, то есть желатинизацию или декстринизацию крахмала на более простые составляющие. Одним из методов перевода крахмала в простые сахара является технология приготовления зерновой кормовой патоки. Использование кормовых патоk, полученных из зерна, в рационе сельскохозяйственных животных – это эффективный и экономически выгодный способ сбалансировать сахаро-протеиновое отношение и устранить недостаток сахаров в питании крупнорогатого скота (КРС). Этот дефицит может достигать 40-70 %, что нарушает физиологические процессы в организме животных, замедляет развитие микрофлоры рубца, снижает перевариваемость питательных веществ и ведёт к проблемам с обменом веществ, снижению продуктивности, накоплению кетонных тел и ухудшению репродуктивных функций.

Применение жидкой зерновой патоки позволяет: сбалансировать углеводно-протеиновое соотношение; повысить поедаемость грубых кормов на 20–25 %; уменьшить потребление комбикорма на 1–2 кг на корову в сутки; уменьшить смертность среди молодняка; повысить прирост живой массы у молодняка и животных на откорме на 25–40 %; увеличить продуктивное долголетие; повысить среднесуточные надои молока на 1–2 литра на корову; уменьшить издержки производства в животноводстве.

Для приготовления патоки из зерновых культур необходимы недорогие и высокотехнологичные установки с низким потреблением электроэнергии. На данный момент существует много похожих однотипных устройств, но их конструкция была разработана интуитивно, без научного обоснования, анализа функциональных узлов установки и математического моделирования. Кроме того, на существующих установках возникают сложности при переработке твёрдых сортов зерна (ячмень и т.д.): их приходится дополнительно предварительно измельчать, что усложняет процесс производства патоки и увеличивает её стоимость. Поэтому разработка новых

моделей таких установок с параметрами и режимами работы, основанных на научных исследованиях и позволяющих осуществлять приготовление патоки без дополнительных предварительных операций, является важной и актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Изучением процессов приготовления зерновой патоки занимались В.В. Аксёнов, В.А. Волков, С.К. Волончук, Н.В. Донкова, А.Н. Зензеров, А.Н. Зернов, Н.А. Трусов, Ю.А. Цой, В.И. Шевченко, А.А. Шевцов и другие исследователи.

В процессе анализа научных работ пришли к пониманию, что для оценки эффективности установки для приготовления зерновой патоки важно учитывать несколько параметров: энергозатраты на нагревание и дробление, качество сваренной патоки и скорость протекания процесса приготовления патоки. Улучшая существующие модели установок для приготовления зерновой патоки и создавая новые, необходимо сосредоточиться на увеличении скорости разрушения зерна, удешевлении стоимости установки, уменьшении энергозатрат и повышении долговечности рабочих элементов.

Цель исследования – повышение показателей энергоэффективности процесса приготовления зерновой патоки.

Для достижения данной цели поставлены следующие **задачи исследований**:

- разработать конструкцию установки для производства зерновой патоки;
- разработать теоретические предпосылки к обоснованию процесса нагрева воды в установке для приготовления зерновой патоки и конструкции дезинтегратора с истирающими поверхностями;
- выявить оптимальные параметры и режимы работы установки в процессе производства зерновой патоки;
- оценить экономическую и энергетическую эффективность разработанной установки.

Объект исследования – процесс приготовления зерновой патоки.

Предмет исследования – конструктивно-технологические параметры установки для производства зерновой патоки с дезинтегратором с пассивными истирающими поверхностями, ее энергетические и качественные показатели работы.

Научную новизну работы составляют:

- конструкция установки для приготовления зерновой патоки с дезинтегратором с пассивными истирающими поверхностями (патент на изобретение № 2760160 Российская Федерация);
- математические зависимости для описания нагрева воды в установке;
- результаты моделирования движения потока воды в дезинтеграторе с пассивными истирающими поверхностями;
- рациональные конструкционные и технологические параметры установки для приготовления зерновой патоки.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложены математические зависимости, позволяющие смоделировать процесс нагрева воды в установке в зависимости от ее конструктивно-технологических параметров, а также модели для определения показателей движения потока воды в дезинтеграторе с пассивными истирающими поверхностями.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования установки для приготовления зерновой патоки в сельскохозяйственном производстве. Производственные испытания проведены в ООО ПЗ «Большемурашкинский».

Методология и методы исследования. В процессе написания диссертации применялись стандартные и специализированные методы, математическое моделирование, а также сертифицированное и современное вычислительное оборудование с программным обеспечением для обработки результатов экспериментов.

Исследование опиралось на следующие источники информации: нормативно-правовые акты, труды известных ученых, аналитические материалы российских и зарубежных научно-исследовательских институтов, а также информацию с официальных сайтов Министерства сельского хозяйства РФ и образовательных учреждений, специализирующихся на решении проблем развития сельского хозяйства. Теоретические исследования построены на законах гидродинамики и теплотехники. Исследования проводились с использованием программы STAR-CCM+, предназначенной для численного моделирования в области гидравлики и газодинамики.

Достоверность основных положений работы подтверждаются совпадением теоретических и экспериментальных исследований, применением современного оборудования и программного обеспечения. Результаты исследований были опубликованы в периодической научной литературе и обсуждались на научных конференциях.

Положения, выносимые на защиту:

- конструкция установки для приготовления зерновой патоки с дезинтегратором с пассивными истирающими поверхностями;
- математические зависимости, описывающие нагрев воды в установке с обводным каналом при заданных значениях мощности насоса и диаметре обводного канала;
- результаты моделирования движения потока воды в дезинтеграторе с пассивными истирающими поверхностями;
- рациональные конструктивно-технологические параметры установки для приготовления зерновой патоки;
- модель, описывающая движение потока воды в дезинтеграторе с пассивными истирающими поверхностями установки в зависимости от изменяемых параметров;
- экономические и энергетические показатели эффективности установки для приготовления зерновой патоки, подтвержденные результатами производственных испытаний.

Апробация. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на V International Conference "AGRITECH V - 2021: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies" held in Krasnoyarsk-Volgograd, Russia / Tashkent-Buhara, Uzbekistan, June 16-19 2021; IV Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов «Актуальные направления развития техники и технологии в России и за рубежом – реалии, возможности, перспективы» (г. Княгинино, НГИЭУ, 2021 г.); II Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и технологии в современном мире» (г. Княгинино, НГИЭУ, 2023 г.); XXVII Международной научно-практической конференции (онлайн-формат) «Инновационная техника и цифровые технологии в животноводстве» (г. Москва, 2023 г.); III Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и технологии в современном мире» (г. Княгинино, НГИЭУ, 2024 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 9 печатных работах, в том числе 2 авторских, 1 публикация в изданиях, индексируемых в

международных базах данных, 6 – в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, получен патент РФ № 2760160 на изобретение.

Личный вклад автора в работу. По теме диссертации автором лично и при его непосредственном участии выполнены все этапы работы, проанализированы существующие технологии и оборудование для производства кормовой зерновой патоки, сформулированы проблема и задачи исследования, разработана установка для приготовления зерновой патоки, теоретически обоснована её конструкция и технология работы, создан лабораторный образец установки, проведены эксперименты по оценке результатов торических исследований и поиску оптимальных параметров работы агрегата, испытана установка в реальных условиях производства и оценена её экономическая и энергетическая эффективность.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 135 страницах машинописного текста, включая 95 наименований библиографических источников, 77 рисунков, 14 таблиц и 7 приложений.

Диссертация состоит: из введения, пяти глав, заключения, списка литературы с 95 наименованиями библиографических источников и 7 приложений, а также 77 рисунков, 14 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования по теме диссертационной работы, сформулирована цель исследования, обозначены научная новизна, практическая значимость результатов и их достоверность, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе «Состояние проблемы и задачи исследования» рассмотрены базовая технология приготовления зерновой патоки, основные конструктивные узлы технологического оборудования, действующие установки по приготовлению зерновой патоки. Приведен анализ особенностей изученной технологии и перспектив её дальнейшего совершенствования.

Изучением процессов приготовления зерновой патоки занимались В.В. Аксёнов, В.А. Волков, С.К. Волончук, Н.В. Донкова, А.Н. Зензеров, А.Н. Зернов, Н.А. Трусов, Ю.А. Цой, В.И. Шевченко, А.А. Шевцов и др. На основании анализа научных публикаций выявлены две основные проблемы технологического процесса – значительные экономические и энергетические затраты, связанные с необходимостью нагрева воды и разрушением зерна, которые требуют ввода дополнительных операций и машин для их реализации. Поэтому создание энергоэффективных и экономичных установок для этой технологии с минимальным количеством компонентов остаётся актуальной задачей. При этом совершенствование подобного оборудования должно быть направлено на получение качественного конечного продукта при высоких показателях производительности и минимальных экономических и энергозатратах.

Во втором разделе «Результаты теоретических исследований» с помощью анализа функционально-морфологической схемы и причинно-следственной диаграммы проведён анализ схемы установки для приготовления зерновой патоки. Разработана схема установки для приготовления зерновой патоки с выделением её подсистем, создана ментальная модель установки с установлением причинно-следственных связей. Предложена расчетная схема для изучения процесса нагрева воды в разработанной

установке (рисунок 1). Определены коэффициенты теплоотдачи гидравлического контура в зависимости от применения труб различного диаметра.

Была проведена оценка нагрева воды в установке. Для этого рассмотрен ее гидравлический контур. В результате получено уравнение, описывающее изменение потребляемой мощности в зависимости от параметров установки:

$$N = Q_6 \frac{dT}{dt} + (\alpha_6 S_6 + \alpha_T S_T)(T - T_K) + K_0(\varepsilon_6 S_6 + \varepsilon_T S_T)(T^4 - T_K^4), \quad (1)$$

где Q_6 – количество теплоты, требуемое для нагрева бака и жидкости на 1 К, Дж/К; T и T_K – температура бака и окружающей среды, К; α – коэффициент теплоотдачи труб и бака, Вт/(м²·К).

Для разработанной установки получена оценка нагрева воды при передаче тепла: - без учета конвекции: $\Delta T = 0,013 \cdot t$; (2)

$$\text{- одной лишь конвекцией: } \Delta T = 332(1 - e^{-3,86 \cdot 10^{-5} t}) \quad (3)$$

В результате совместного решения уравнений (1), (2) и (3) численным методом в среде Matlab определены значения температуры воды и потребляемой мощности. Теоретические графики нагрева воды в установке представлены на рисунке 2. Для рассмотренной схемы установки определено, что нагрев 100 литров воды от 0 °С до необходимых 40 °С при использовании обводного канала диаметром 32 мм занимает 74 минуты, 50 мм – 45 минут, 65 мм – 42 минуты.

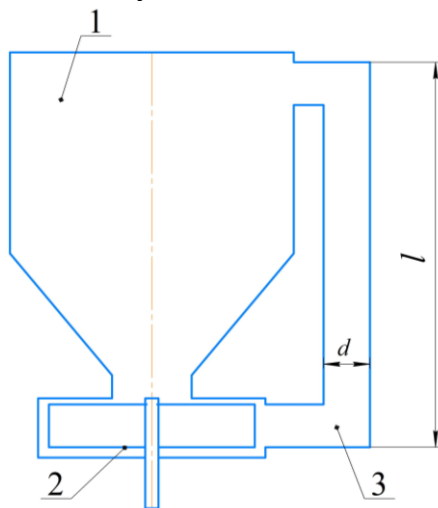


Рисунок 1 – Расчетная схема установки для получения зерновой патоки:

1 – накопительная секция; 2 – насосная секция; 3 – обводной канал

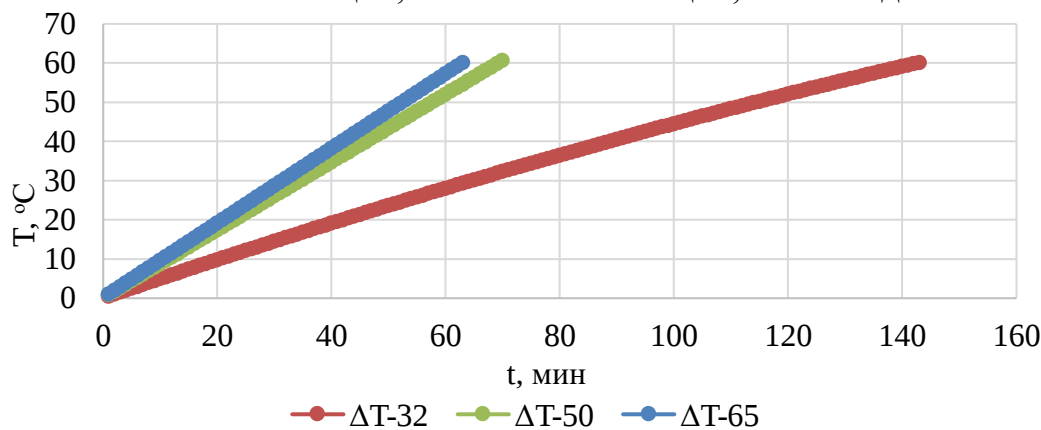


Рисунок 2 – Расчетный график нагрева воды в зависимости от внутреннего диаметра обводного канала

Применение различных диаметров обводного канала влияет и на энергетические показатели работы установки. Определено, что при нагреве воды с диаметром обводного канала, равным 32 мм, расчетная потребляемая мощность составляет 3,9 кВт, 50 мм – 5,5 кВт, 65 мм – 6,5 кВт (рисунок 3, а). На основании полученных расчетных значений определены удельные энергозатраты на нагрев воды (рисунок 3, б). Оценивая нагрев воды в совокупности двух критериев (времени нагрева и удельных энергозатрат), определено рациональное значение внутреннего диаметра обводного канала – 50 мм.

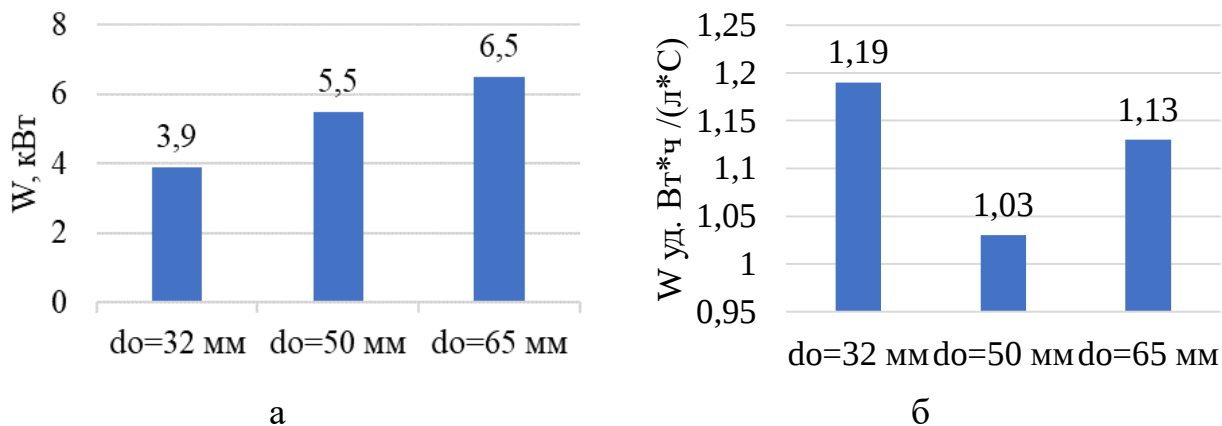


Рисунок 3 – Энергетические показатели установки

Для ускорения разрушения зерна предлагается включить в состав установки пассивный дезинтегратор и проводить измельчение зерна с его помощью.

Были предложены два варианта пассивного дезинтегратора: в виде перфорированной прямой решетки, расположенной под некоторым углом в обводном канале (рисунок 4, а) и цилиндрической решетки, установленной внутри обводного канала гидравлического контура установки (рисунок 5).

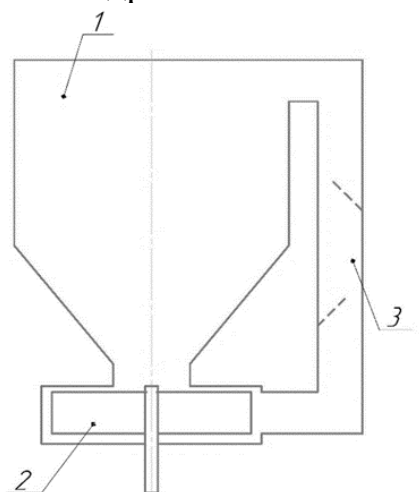


Рисунок 4 – Схема установки для приготовления зерновой патоки с пассивным дезинтегратором в виде перфорированной прямой решетки: 1 – корпус; 2 – насос; 3 – пассивный дезинтегратор

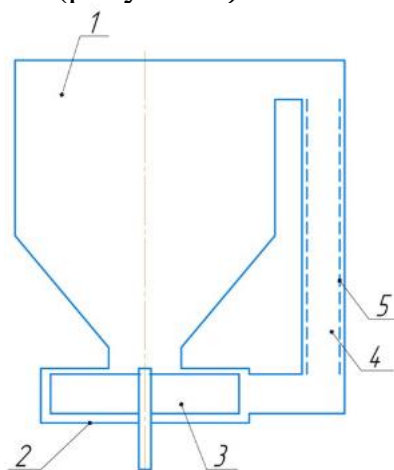


Рисунок 5 – Схема установки для приготовления зерновой патоки с пассивным дезинтегратором в виде цилиндрической решетки: 1 – бак; 2 – корпус насоса; 3 – крыльчатка насоса; 4 – обводной канал; 5 – трубный дезинтегратор

Было проведено моделирование движения потока воды в пассивном дезинтеграторе. Моделирование проводилось в программе Star-CCM+. Задавались следующие условия: обтекание потоком воды двух решеток, расположенных на расстоянии L ; диаметр трубы $d = 30$ мм; длина расчетного участка 1 м. Рассматривалась решётка дезинтегратора в виде перфорированной пластины толщиной 3 мм. Характеристики решётки задали, исходя из паспортных данных выпускаемых промышленностью стандартных перфорированных листов: расстояние между осями соседних отверстий решетки 14 мм, диаметр отверстий решетки 6 мм. Из паспорта насоса в программу вносился массовый расход $G=7$ кг/с. Давление на выходе из измельчителя задавалось равным 6 атм. При моделировании использовалась k-w sst модель турбулентности ($Re=3,4 \cdot 10^5$).

Исходное уравнение Бернулли для стационарного потока записывается:

$$\frac{V_{in}^2}{2g} + \frac{p_{in}}{\rho g} = \frac{V_{out}^2}{2g} + \frac{p_{out}}{\rho g} + \xi \frac{V_{out}^2}{2g}, \quad (4)$$

где V_{in} – скорость жидкости при входе, м/с; P_{in} – атмосферное давление, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; V_{out} – скорость жидкости при выходе, м/с; P_{out} – давление на выходе, Па; ξ – коэффициент сопротивления при сужении.

Относительный перепад давления вычислялся как $\frac{\Delta p}{p_{in}}, \quad (5)$

где ΔP – изменение давления за время испытаний, Па;

сопротивление решетки $\xi = \frac{\Delta p + \rho[V_{in}^2 - V_{out}^2]/2}{(\rho V_{out}^2)/2}. \quad (6)$

Мощность тепловых потерь определялась из уравнения Бернулли:

$$W = (\Delta p + \rho[V_{in}^2 - V_{out}^2]/2) \cdot S \cdot V_{in}, \quad (7)$$

где S – площадь боковых поверхностей, м².

По результатам расчетов выявлено, что:

- при варианте исполнения пассивного дезинтегратора в виде перфорированной решетки (рисунок 4) наблюдается значительное увеличение сопротивления сети и потерь мощности водяного потока. Данная схема неэффективна (таблица 1).

Таблица 1 – Влияние решеток на показатели движения воды в пассивном дезинтеграторе в виде перфорированной прямой решетки (рисунок 4)

Наименование показателя	Без решетки	Расстояние между решетками L, мм	
		100	200
Относительный перепад давления, %	20	39,5	38,3
Коэффициент сопротивления ξ	0,51	7,9	7,5
Потери мощности потока, кВт	0,17	2,75	2,6

- схема исполнения пассивного дезинтегратора в виде цилиндрической решетки (рисунок 5) обладает малыми потерями мощности и давления в гидравлическом контуре установки (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние решеток на показатели движения воды в пассивном дезинтеграторе в виде цилиндрической решетки (рисунок 5)

Показатель	D=30 мм, L=0 мм	D=50 мм, L=0 мм	D=30 мм, L=100 мм	D=50 мм, L=100 мм	D=30 мм, L=200 мм	D=50 мм, L=200 мм	D=50 мм, L=1000 мм
$\frac{\Delta p}{p_{in}}, \%$	20	0,7	22	1,3	25	1,5	2,4
ξ	0,51	0,35	1,74	0,64	2,0	0,7	0,7
W, кВт	0,17	0,005	0,58	0,009	0,68	0,01	0,022

В результате моделирования движения потока воды в дезинтеграторе с пассивными истирающими поверхностями определены форма и размеры дезинтегратора: трубный дезинтегратор с внутренним диаметром 50 мм, отверстиями 6 мм с максимально возможной длиной решетки (таблица 3).

Таблица 3 – Сравнение решеток на показатели движения воды в пассивном дезинтеграторе с цилиндрической решеткой (рисунок 5)

	Без решетки	Решетка- (6) - 44 - 1000 мм	Решетки- (4)-44 - 1000 и 700 мм	Решетки- (6)-44 - 1000 и 700 мм	Решетки- (8)-44 - 1000 и 700 мм
Относит. перепад давления, %	34	7	44	44	26
Перепад давления, атм	1,6	0,1	0,8	0,8	1,06
Сопротивление ξ	10,8	0,5	5,5	5,5	7,0
Мощность потерь W, кВт	0,58	0,06	0,28	0,28	0,36

В третьем разделе «Программа экспериментальных исследований» изложена программа исследований, представлена экспериментальная установка, приборы и измерительная аппаратура, применяемые в ходе исследований.

Была разработана экспериментальная установка для приготовления зерновой патоки (рисунок 6), позволяющая проводить эксперименты по приготовлению зерновой патоки, фиксируя измеряемые параметры в режиме реального времени, производить отбор проб патоки.

Исследовали влияние внутреннего диаметра обводного канала на процесс нагрева воды в разработанной установке. Для этого были изготовлены обводные каналы с внутренним диаметром 32 мм, 50 мм и 65 мм. На втором этапе исследований проводилась оценка влияния параметров трубчатого дезинтегратора с внутренним диаметром 50 мм и диаметрами отверстий 4, 6 и 8 мм (рисунок 7).

Для определения эффективности работы предлагаемой установки в условиях научной лаборатории разработана методика, позволяющая оценить влияние

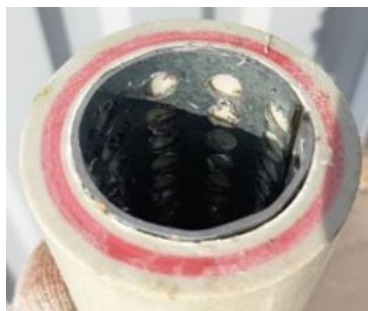
конструкционных и режимных параметров на рабочий процесс приготовления зерновой патоки, состоящий из двух этапов:

Этап 1. При исследовании нагрева в емкость заливали 100 л воды, включали насос. По регулятору температуры определяли изменение температуры воды и через каждый градус фиксировали потребляемую мощность. После опыта рассчитывали удельные энергозатраты на нагрев 1 л воды на 1 °С.

Этап 2. Приготовление патоки проходило в следующей последовательности: в накопительную емкость заливали 50 литров воды, включали насос, вода под действием лопаток насоса нагревалась и при достижении 40 °С засыпали 25 кг зерна, добавляли ферменты МЭК. Через каждые 7,5 минут проводили фиксацию потребляемой мощности и отбор проб патоки. Так продолжалось, пока смесь нагревалась до 60 °С, после чего установка выключалась, отбиралась финальная партия патоки. Далее установку промывали и проводили следующий опыт. Качество патоки оценивали по количеству целых зерен в готовом продукте. Для оценки энергоэффективности установки определялись удельные энергозатраты при нагреве воды (как отношение потребляемой мощности двигателя, затрачиваемой на нагрев единицы объема воды на 1°С) и удельные энергозатраты при приготовлении патоки (отношение потребляемой мощности двигателя к единице объема готовой кормосмеси).



Рисунок 6 – Установка для приготовления зерновой патоки



а



б

Рисунок 7 – Пассивный дезинтегратор (а) и варианты исполнения (б)

Лабораторные исследования проведены в соответствии с действующими ГОСТами, общепринятыми и частными методиками испытаний техники, обеспечивающими получение первичной информации в виде реализаций случайных процессов с последующей их обработкой на персональном компьютере при помощи прикладных программ.

В четвертом разделе «Результаты экспериментальных исследований установки для приготовления зерновой патоки» представлены результаты исследований по изучению способов нагрева воды в лабораторной установке для приготовления зерновой патоки (рисунок 8). Изучение полученных результатов наглядно демонстрирует влияние диаметра обводного канала установки на

нагрев воды, представленный на рисунке 8. По результатам экспериментальных исследований по нагреву воды в установке для приготовления зерновой патоки с различными диаметрами гидравлического контура можно утверждать, что вода нагревается быстрее в полтора раза при применении обводного канала с внутренним диаметром 50 мм. Использование обводного канала с внутренним диаметром 65 мм разницы относительно диаметра 50 мм не имеет.

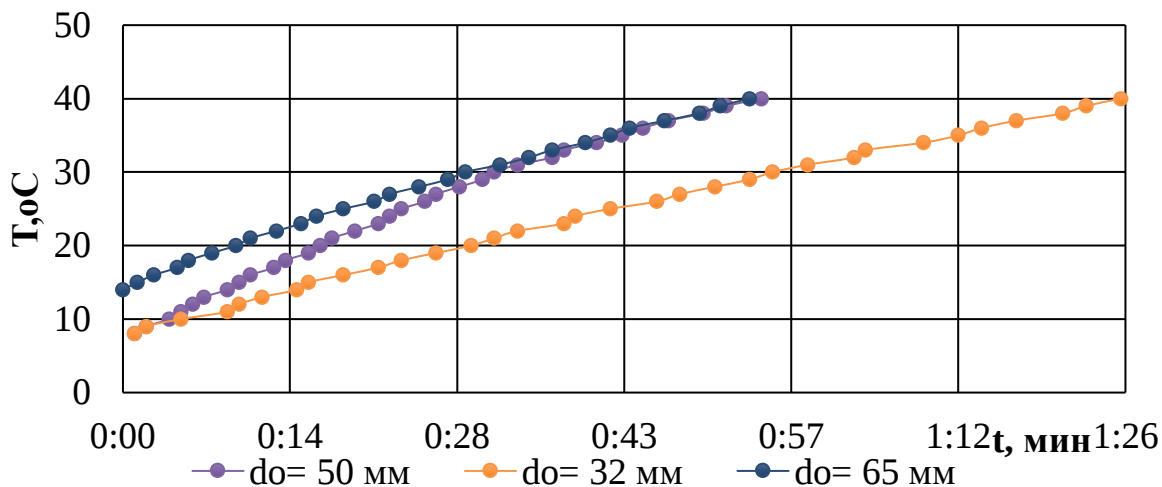


Рисунок 8 – Изменение температуры при нагреве 100 л воды в разработанной установке с различными вариантами гидравлического контура

Влияние внутреннего диаметра обводного канала на потребляемую мощность и удельные энергозатраты показаны на рисунках 9 и 10. При рассмотрении результатов исследований видно, что потребляемая мощность электродвигателя пропорционально возрастает и при $d = 32$ мм составляет 3,9 кВт, при $d = 50$ мм – 6,3 кВт, а при $d = 65$ мм – 7,0 кВт. С точки зрения энергоэффективности, лучше использовать вариант исполнения обводного канала с диаметром 50 мм. В этом случае удельные энергозатраты на 10% ниже, чем при $d = 32$ мм и при $d = 65$ мм.

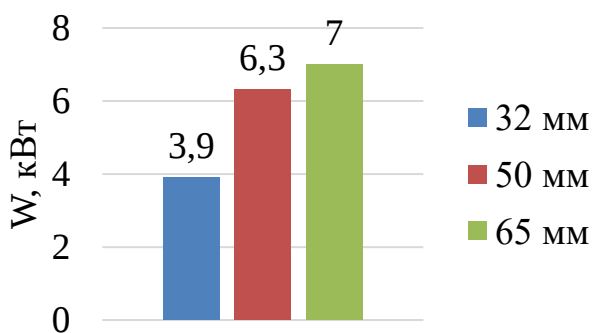


Рисунок 9 – Влияние диаметра гидравлического контура на потребляемую мощность электродвигателя

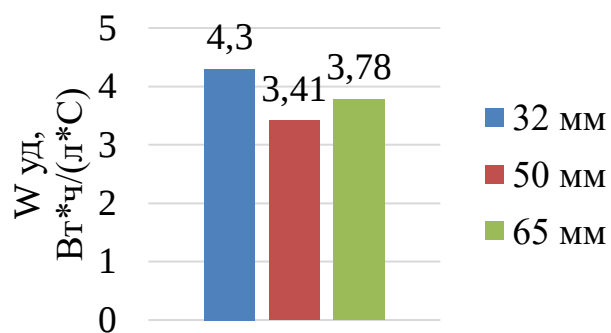


Рисунок 10 – Влияние диаметра гидравлического контура на удельные энергозатраты

Далее проводились исследования трех исполнений трубчатого дезинтегратора с внутренним диаметром 50 мм и диаметрами отверстий 4, 6 и 8 мм при нагреве 50 л воды. Анализ данных показал, что увеличение диаметра отверстий с 4 до 6 мм позволяет ускорить нагрев: время нагрева воды с 12 до 40 °C сокращается с 32 до 26 минут. Однако дальнейшее увеличение диаметра отверстий до 8 мм привело к

незначительному увеличению времени нагрева из-за резкого роста турбулентности и увеличения сопротивления трубчатого дезинтегратора (рисунок 11).

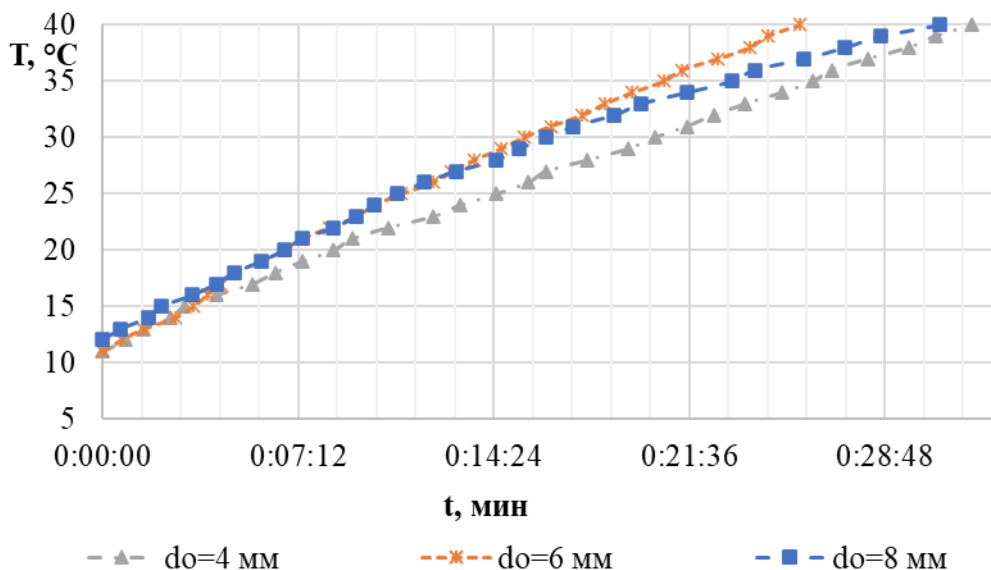


Рисунок 11 – Влияние диаметра отверстий пассивного дезинтегратора на нагрев воды в установке для приготовления патоки

Увеличение диаметра отверстий дезинтегратора также влияет на энергопотребление установки (рисунки 12, 13). При работе установки для нагрева воды с помощью трубчатого дезинтегратора с диаметром отверстий 6 мм мощность, потребляемая электродвигателем, увеличивается с 4,9 до 6,8 кВт. С увеличением диаметра отверстий до 8 мм мощность возрастает незначительно и составляет 7 кВт. Таким образом, можно сделать вывод, что энергозатраты растут с увеличением диаметра отверстий трубчатого дезинтегратора.

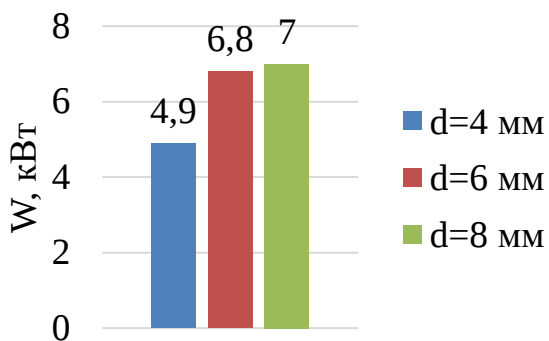


Рисунок 12 – Влияние диаметра отверстий трубчатого дезинтегратора на потребляемую мощность электродвигателя при нагреве воды

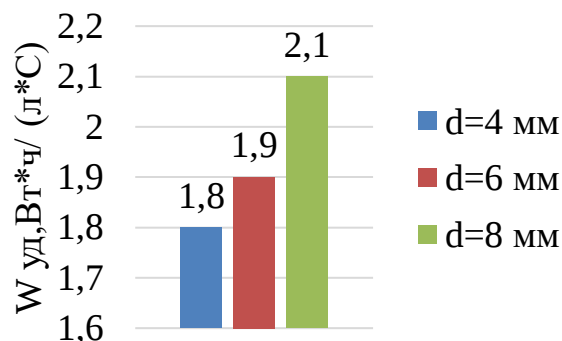


Рисунок 13 – Влияние диаметра отверстий трубчатого дезинтегратора на удельные энергозатраты при нагреве воды

Анализируя нагрев воды по совокупности двух параметров (времени нагрева и удельным энергозатратам), можно сделать вывод, что оптимальный диаметр отверстий трубчатого дезинтегратора составляет 6 мм.

На втором этапе исследования определялось влияние параметров установки по приготовлению зерновой патоки на разрушение зерна. С данной целью была изучена работа установки без пассивного дезинтегратора. Зерновую патоку приготовили из пшеницы «Московская 39». Выявлено, что через 22,5 минуты после начала процесса в патоке всё ещё оставались целые зёрна. Через 30 минут целых зёрен в патоке не зафиксировано. Процесс измельчения проходил медленно, о чём говорит пологая кривая на графике (рисунок 14).

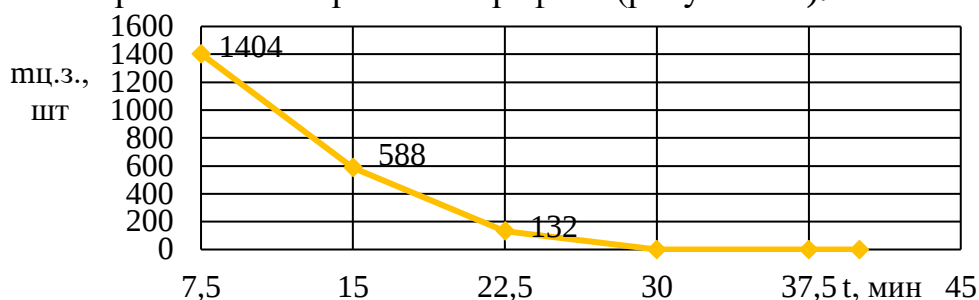


Рисунок 14 – Изменение количества целых зерен в водно-зерновой смеси при приготовлении патоки из зерна пшеницы без пассивного дезинтегратора

Далее эксперименты проводились на установке с применением пассивного дезинтегратора и использованием зерна пшеницы, ржи и ячменя. Изменение качественных показателей представлено на рисунках 15, 16 и 17. Результаты сравнения с данными, полученными без дезинтегратора, показали, что дезинтегратор ускоряет процесс разрушения зерна.

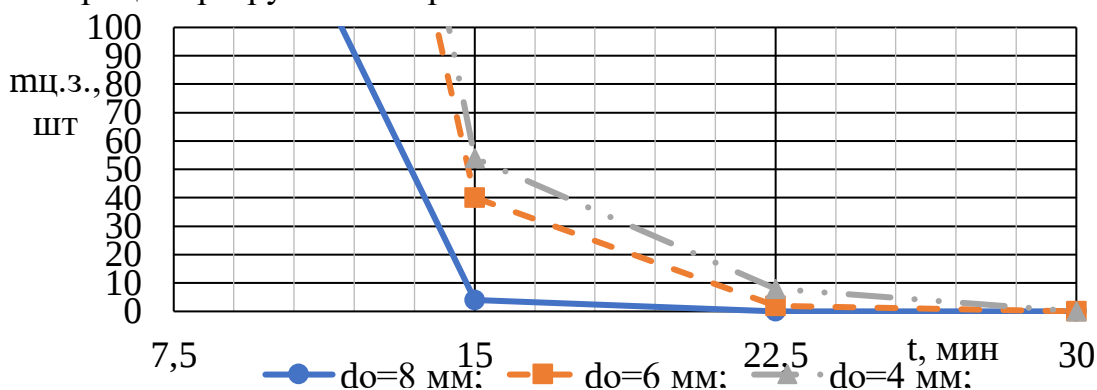


Рисунок 15 – Изменение количества целых зерен в водно-зерновой смеси при приготовлении патоки из зерна пшеницы с пассивным дезинтегратором

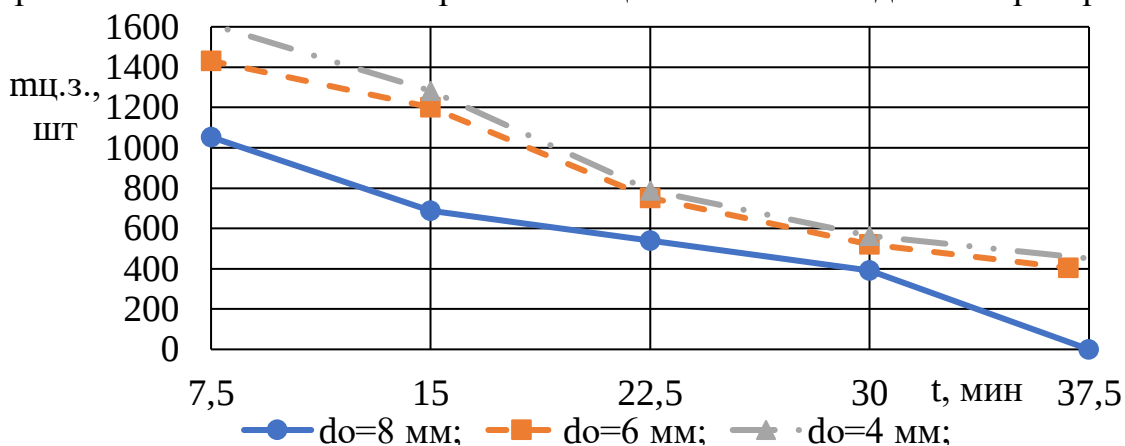


Рисунок 16 – Изменение количества целых зерен в водно-зерновой смеси при приготовлении патоки из зерна ячменя с пассивным дезинтегратором

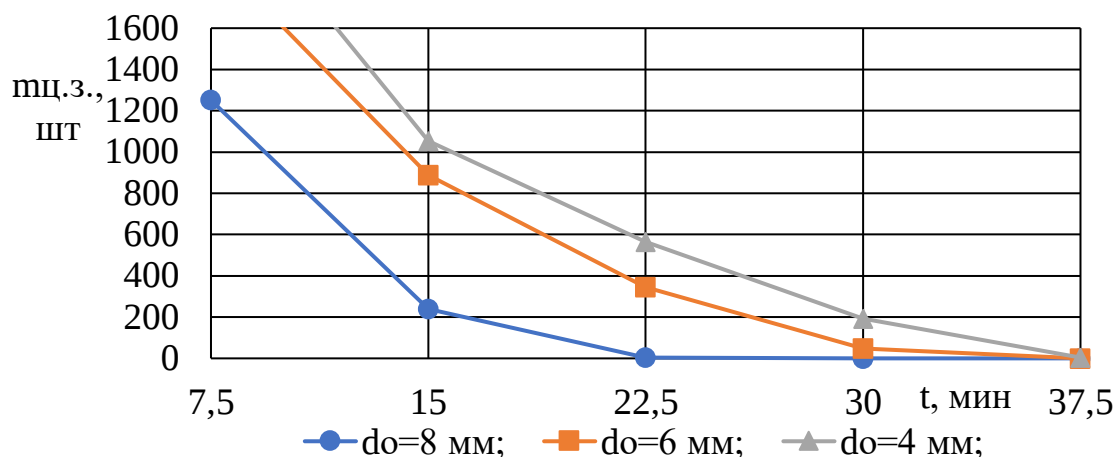


Рисунок 17 – Изменение количества целых зерен в водно-зерновой смеси при приготовлении патоки из зерна ржи с пассивным дезинтегратором

Энергетическая оценка проводилась через удельные энергозатраты. Результаты энергетической оценки при приготовлении патоки из пшеницы, ржи и ячменя сведены в одном графике для удобства восприятия и анализа (рисунки 18, 19). Сравнение энергетических показателей работы показало, что средняя потребляемая мощность электродвигателя выше при приготовлении патоки из зерна пшеницы, чем из зерна ржи или ячменя. Это объясняется тем, что зерно пшеницы мягче зерен ржи и ячменя и разбивается быстрее.

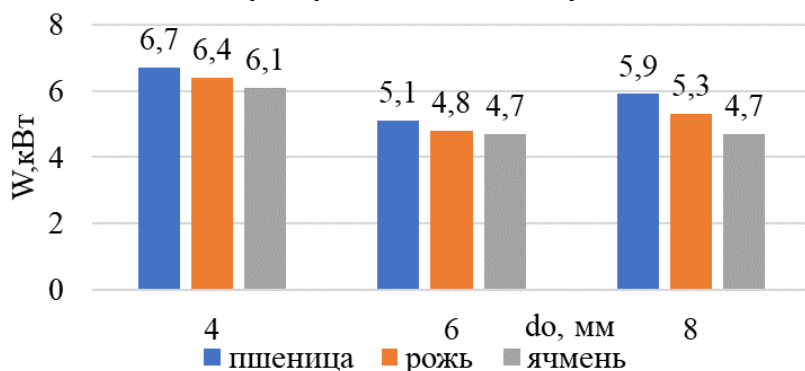


Рисунок 18 – Влияние диаметра отверстий цилиндрической решетки пассивного дезинтегратора на полную потребляемую мощность электродвигателя

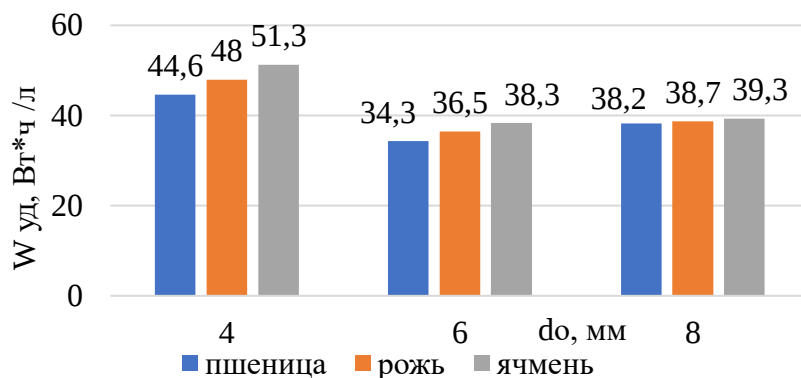


Рисунок 19 – Влияние диаметра отверстий цилиндрической решетки пассивного дезинтегратора на удельные энергозатраты процесса приготовления патоки

При анализе графиков выявлено, что трубчатый дезинтегратор с отверстиями 6 мм максимально эффективно разрушает зерновки в установке при приготовлении зерновой патоки из мягких видов зерна (пшеница и т.д.): удельные энергозатраты на весь цикл приготовления пшеничной патоки составили 91,8 Вт·ч/л, время приготовления – 58 мин. При приготовлении зерновой патоки из ржи – 96,2 Вт·ч/л и 59 мин соответственно. При приготовлении зерновой патоки из твердых видов зерна

(ячмень и т.д.) рекомендуется применять трубчатый измельчитель, в котором диаметр отверстий составляет 8 мм. При этом удельные энергозатраты на весь цикл приготовления патоки составляют 98,7 Вт·ч/л, время приготовления – 60 мин.

Как показали результаты исследований, трубчатый дезинтегратор достаточно эффективно способствует разрушению зерновок. Однако при использовании цилиндрической решетки с отверстиями 6 мм, обеспечивающей минимальные энергозатраты, зерна ячменя разрушаются не полностью. Поэтому было принято решение установить на выходе из гидравлического контура дополнительную истирающую решетку и оценить ее влияние на процесс приготовления патоки. К верхней крышке емкости установки посредством болтовых соединений была прикреплена истирающая решетка. Схема установки и общий вид истирающей решетки представлен на рисунке 20. Испытания усовершенствованной установки проводились по той же методике, что и с трубчатым дезинтегратором без дополнительной истирающей решетки.

В результате проведенных исследований выявлено, что при установке дополнительной истирающей решетки удельные энергозатраты снижаются на 2 Вт·ч/л, что составляет 5,2% относительно варианта без истирающей решетки (рисунок 21).

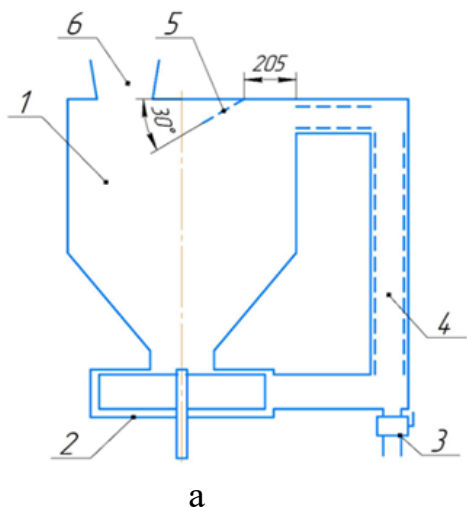


Рисунок 20 – Установка для приготовления патоки с трубчатым дезинтегратором и истирающей решеткой: а – схема; б – общий вид пластины; 1 – накопительная емкость; 2 – насос; 3 – сливной кран; 4 – трубчатый дезинтегратор; 5 – истирающая решетка; 6 – загрузочная горловина

Снижение энергозатрат произошло за счет ускорения времени нагрева водно-зерновой смеси, обусловленного ее дополнительным трением о поверхность решетки. Одновременно на фоне дополнительного разрушительного столкновения водно-зерновой смеси с поверхностью истирающей решетки происходит более интенсивное разрушение зерновок (рисунок 22). В результате этого, уже через 22,5 мин. количество целых зерновок в 100 г патоки составляет 20 шт., а к концу процесса ее приготовления целых зерен не наблюдается.

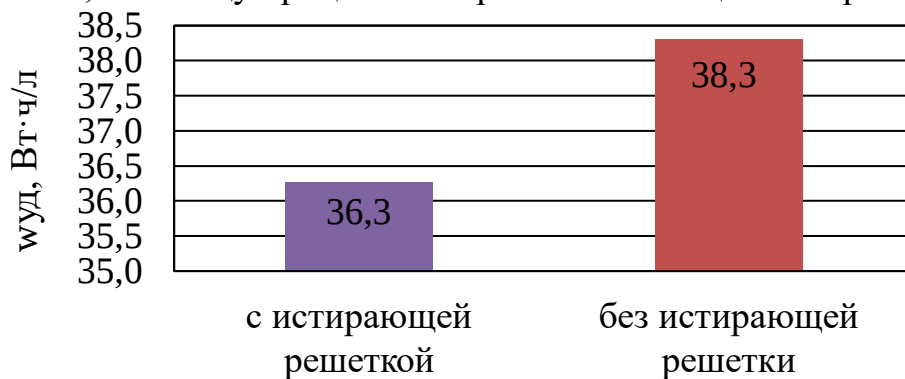


Рисунок 21 – Влияние истирающей решетки на удельные энергозатраты

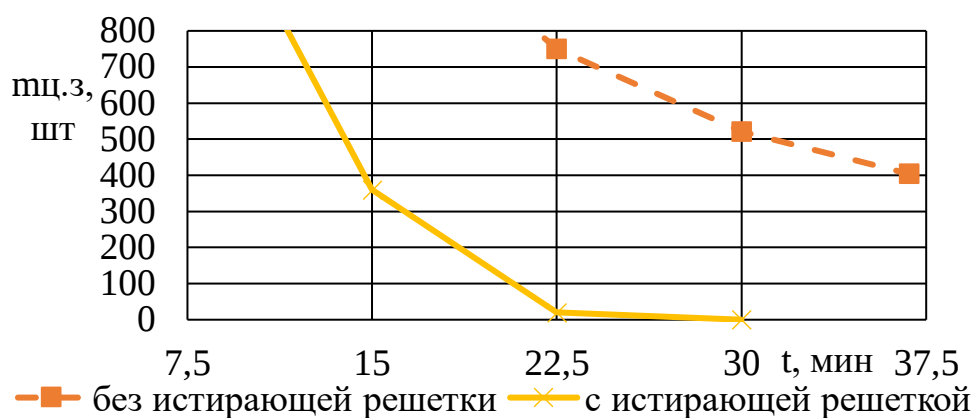


Рисунок 22 – Влияние истирающей пластины на количество целых зерен в водно-зерновой смеси при приготовлении патоки из зерна ячменя

Производственные исследования установки по приготовлению зерновой патоки проводились в цехе по приготовлению рассыпных комбикормов на племенном заводе ООО ПЗ «Большемурашкинский», расположенном в пос. Советский Большемурашкинского района Нижегородской области в период с 22 по 28 июля 2024 г. Температура окружающего воздуха во время проведения эксперимента составляла 24⁰С. Установка по приготовлению зерновой патоки находилась в комплектации с трубным измельчителем, расположенным в обводном канале установки, и истирающей решеткой в накопительном баке. В результате проведенных исследований установлено, что при приготовлении патоки из пшеницы сорта «Немчиновская-17» (данный сорт пшеницы используется в качестве корма КРС в ООО ПЗ «Большемурашкинский») через 7,5 минут после внесения зерна в установку с водой при взятии пробы зерновой патоки целые зерна отсутствуют. При этом среднее значение полной потребляемой мощности электродвигателя за весь цикл приготовления патоки составило 5,1 кВт, а удельные энергозатраты – 64,3 Вт·ч/л, время полного цикла приготовления патоки – 56,7 мин.

В пятом разделе «Эффективность работы установки для приготовления зерновой патоки» приведены результаты расчетов технико-экономических и энергетических показателей разработанной установки. Энергетическая оценка показала, что разработанная установка для приготовления зерновой патоки по сравнению с выпускаемой установкой УЖК-500 позволяет снизить энергозатраты на 67%. На основании анализа технико-экономических показателей выявлено, что установку по приготовлению зерновой патоки по сравнению с УЖК-500 при использовании в специализированных хозяйствах с малым количеством голов эксплуатировать целесообразнее и эффективнее. Прямые эксплуатационные затраты у разработанного варианта меньше на 49 %, годовая экономия денежных средств у разработанного варианта 250828,4 руб., при сроке окупаемости 2,1 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучены различные методы и оборудование для производства зерновой патоки. На основе полученных знаний и созданной схемы была разработана эффективная установка, которая содержит пассивные дезинтеграторы и истирающие поверхности. Данная установка позволит производить зерновую патоку прямо на сельскохозяйственном предприятии из собственного сырья.

2. Получены аналитические выражения, которые позволяют точно рассчитать тепловые процессы в разработанной установке, благодаря которым удалось определить, что для рассмотренной схемы установки нагрев 100 л воды от 0 до 60 °С занимает 1,3 часа при отсутствии теплообмена с окружающей средой и 1,6 часа – в случае его наличия. При этом оптимальный диаметр трубы обводного канала составляет 50 мм. При моделировании движения жидкости в дезинтеграторе с пассивными истирающими поверхностями определены его конструкция и параметры: цилиндрическая решетка максимально возможной длины с отверстиями 6 мм и внутренним диаметром 50 мм.

3. Определены оптимальные параметры установки, позволяющие получить качественную патоку с минимизацией энергозатрат: дезинтегратор в виде цилиндрической решетки с отверстиями 6 мм и внутренним диаметром 50 мм, наличие дополнительной истирающей решетки на выходе из трубчатого измельчителя. При этом удельные энергозатраты в процессе приготовления ячменной патоки составляют 67 Вт·ч/л, время полного цикла приготовления – 58,2 мин., удельные энергозатраты и время приготовления пшеничной патоки составляют соответственно 64,3 Вт·ч/л и 56,7 мин.

5. Годовая экономия денежных средств от внедрения разработанной установки в сравнении с УЖК-500 составит 250828,4руб. при сроке окупаемости 2,1 года, а снижение энергозатрат – 67% при суточном объеме 220 л.

Рекомендации производству. С целью снижения энергозатрат и повышения качества готового продукта рекомендуется применение установки для приготовления зерновой патоки с дезинтегратором в виде цилиндрической решетки с отверстиями 6 мм и внутренним диаметром 50 мм при наличии дополнительной истирающей решетки на выходе из трубчатого измельчителя.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Проведенные исследования могут стать основой при разработке технологий и технических средств производства гранулированных комбикормов с добавлением в них зерновой патоки.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Статьи в изданиях, входящие в международную реферативную базу данных и систем цитирования Scopus

1. Semenov, S V. Causal diagram with positive and negative feedbacks of the grain molasses production process / S V Semenov, S Yu Bulatov, A E Krupin, N P Shkilev // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2021– 848.

Публикации в рецензируемых научных изданиях

2. Семенов, С. В. Результаты моделирования движения потока воды в трубчатом измельчителе установки для приготовления зерновой патоки / С. В. Семенов, С. Ю. Булатов // Вестник Омского ГАУ. – 2024. – №4. – С.114–121.

3. Семенов, С. В. Функционально-морфологическая схема установки для приготовления зерновой патоки. / С. В. Семенов, С. Ю. Булатов, А. Г. Сергеев // Техника и оборудование для села. – 2021. – № 9 (291). – С. 18–22.

4. Семенов, С. В. Моделирование движения потока воды в пассивном дезинтеграторе установки для зерновой патоки. / С. В. Семенов, С. Ю. Булатов // Техника и технологии в животноводстве. – 2023. – №4 (52) – С.86–90.

5. Семенов, С. В. Результаты исследований рабочего процесса установки для приготовления зерновой патоки с трубчатым измельчителем / С. В. Семенов, С. Ю. Булатов // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. – № 2(78). – С. 128–133.

6. Семенов, С. В. Результаты теоретических исследований нагрева воды в установке для приготовления зерновой патоки. / С. В. Семенов // Вестник Чувашского ГАУ. – 2024. – №2 (29) – С. 176–181.

7. Семенов, С. В. Результаты исследований влияния трубчатого измельчителя на процесс нагрева воды в установке для приготовления зерновой патоки. / С. В. Семенов, С. Ю. Булатов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2024. – №5 (235) – С.26–30.

Статьи в сборниках и других научных изданиях

8. Семенов, С. В. Анализ конструкций технических средств приготовления зерновой патоки. / С. В. Семенов, С. Ю. Булатов // Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. В сборнике трудов конференции. – 2021. – С.26–30.

9. Семенов, С. В. Результаты расчетов трубчатого измельчителя установки для приготовления зерновой патоки. / С. В. Семенов // Вестник Вятского ГАУ. – 2024. – №1 (19) – С. 1–11.

Патенты

10. Пат. 2760160 РФ, МПК А23К 10/30. Установка для получения зерновой патоки / С. В. Семенов, С. Ю. Булатов, К. Е. Миронов, В. Н. Нечаев. – № 2021104268. Заявл. 19.02.2021; Опубл. 22.11.2021. – Бюл. № 33. – 6 с.: ил.

Подписано в печать 23.10.2024 г.

Формат 60х90, 1/16. Бумага писчая. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 1,00. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № 28.

Отпечатано в ИПЦ НГИЭУ с оригинал-макета
606340, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, 22а.