

*На правах рукописи*

**Рыбалкин Дмитрий Алексеевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЛУЗГИ  
КРУПЯНЫХ И МАСЛИЧНЫХ КУЛЬТУР ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ  
МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ**

Специальность: 05.20.01 – Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Саратов – 2018

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»

**Научный руководитель:** **Елисеев Михаил Семенович**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Савиных Петр Алексеевич**  
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией «Механизация животноводства» ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого», г. Киров

**Терюшков Вячеслав Петрович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технический сервис машин» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет»

**Ведущая организация:** ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», г. Княгинино

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 2018 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325 им. А.В. Дружкина.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ <http://www.sgau.ru>.

Отзывы на автореферат просим направлять ученому секретарю диссертационного совета по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1. E-mail: [chekmarev.v@yandex.ru](mailto:chekmarev.v@yandex.ru)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Василий Васильевич Чекмарев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время одной из важных в России проблем является утилизация отходов, получаемых после шелушения крупяных и масличных культур (лузга подсолнечника, гречихи, проса и др.).

На территории Российской Федерации по данным Росстата в среднем за 2015-2017 гг. валовый сбор проса составляет 0,7 млн. т., гречихи – 1,2 млн. т., подсолнечника – 10,8 млн. т. После переработки данных культур существенную долю составляет лузга: проса – 12-25% (до 180 тыс. т/год), гречихи – 18-28% (до 400 тыс. т/год), подсолнечника – 35-78 % (до 7 млн. т/год).

Данные отходы накапливаются локально на свалках, отвалах и под влиянием природных и временных факторов разлагаются, что в свою очередь ведет к ухудшению экологической обстановки. Так же большие материальные затраты требуются для погрузки, транспортировки и утилизации данных отходов в виду их низкой насыпной плотности.

Утилизация лузги в целях ее использования в различных видах производства позволит решить глобальную экологическую проблему. Так, например, лузга может служить в качестве твердого биотоплива, добавок к кормовым смесям для крупного рогатого скота и птицы, связующего компонента в дорожно-строительном производстве, различных удобрений и почвозащитных средств, сорбентов для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов.

Одной из основных операция, влияющих на качество получаемого продукта и на энергозатраты, необходимые на его производство является операция измельчения. Поиск оптимизации операции измельчения, как показали исследования различных ученых, возможен за счет применения наиболее эффективного измельчающего устройства.

Наиболее распространенными измельчающими машинами в сельскохозяйственном производстве являются молотковые дробилки. Однако их конструкция и организация рабочего процесса обладают рядом недостатков, что ведет к снижению производительности и значительным затратам энергии при измельчении лузги крупяных и масличных культур.

В связи с этим, повышение производительности и снижение энергоемкости процесса измельчения лузги крупяных и масличных культур молотковыми дробилками, за счет совершенствования их конструктивно-режимных и технологических параметров, является актуальной задачей.

Работы выполнены в соответствии со «Стратегией развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года» (распоряжение Правительства РФ от 25 января 2018 г. № 84-р).

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросом процесса измельчения занимались как отечественные, так и зарубежные ученые: Мельников С.В., Роцин П.М., Алешкин В.Р., Сыроватка В.И., Кирпичников Ф.С., Плохов Ф.Г., Ревенко И.И., Опрышко В.М., Рабинович Б.Д., Гудков А.Н., Елисеев В.А., Риттингер, Bond F.C., Silver E.A., P., W. Kruger, A. Hendrix и др.

Как показывает анализ существующих конструкций молотковых дробилок, а также литературный обзор теоретических исследований, были выявлены основные проблемы, присущие большинству конструкций молотковых дробилок, а именно: неравномерность подачи измельчаемого материала с низкой насыпной плотностью к рабочим органам, а также достаточно высокая энергоемкость процесса их измельчения требует дальнейших исследований.

**Цель исследования:** повышение производительности и снижение энергоемкости процесса измельчения лузги крупяных и масличных культур за счет модернизации молотковой дробилки.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

1. Провести анализ существующих сельскохозяйственных измельчающих машин и разработать конструктивно-технологическую схему молотковой дробилки для измельчения лузги крупяных и масличных культур;

2. Теоретически исследовать влияние конструктивно-режимных и технологических параметров рабочего процесса молотковой дробилки на производительность и энергоемкость процесса измельчения;

3. Экспериментально исследовать влияние конструктивно-режимных параметров модернизированной молотковой дробилки на качественные и энергетические показатели готового продукта;

4. Провести производственные испытания молотковой дробилки и дать оценку технико-экономической эффективности от внедрения ее в производство.

**Объектом исследования** является технологический процесс подачи и измельчения лузги крупяных и масличных культур в молотковой дробилке с получением готового продукта требуемой крупности.

**Предметом исследования** являются закономерности влияния основных и конструктивно-режимных и технологических параметров молотковой дробилки на производительность и энергоемкость процесса измельчения лузги крупяных и масличных культур.

**Научная новизна:**

- разработана и обоснована конструктивно-технологическая схема молотковой дробилки, позволяющей измельчать лузгу крупяных и масличных культур с минимальной энергоемкостью;

- получены аналитические зависимости, позволяющие определить характер и степень влияния конструктивно-режимных и технологических параметров работы молотковой дробилки на показатели процесса измельчения.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы заключается в разработке и обосновании аналитических зависимостей, описывающих процесс подачи и измельчения лузги крупяных и масличных культур в молотковой дробилке.

Разработана и обоснована перспективная конструкция молотковой дробилки, позволяющая измельчать лузгу крупяных и масличных культур с минимальными энергозатратами. Новизна подтверждена патентами на изобретение № 2615001 и полезные модели №№ 166614, 167330.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная конструкция подтверждается исследованиями на сельскохозяйственных предприятиях как ООО «Марс-07» (г. Саратов), ЗАО «Алтайская крупа» (Алтайский край, Советский р-н, с. Советское), КФХ «Демкин А.П.» (Саратовская обл., Екатериновский р-н, с. Упоровка) в качестве средства для измельчения лузги крупяных и масличных культур, где получен положительный эффект.

#### **Методология и методы исследования.**

В работе применялись теоретические и экспериментальные исследования.

Теоретические исследования проводились на основе общепринятых законов классической механики, математики и математической статистики.

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с общепринятыми методиками проведения экспериментов, действующих стандартов и нормативных документов.

Расчет и обработка полученных результатов выполнялись методами математической статистики с использованием персонального компьютера с пакетом прикладных программ STATISTICA 12.7 и Microsoft Excel 2010.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

- конструктивно-технологическая схема молотковой дробилки, позволяющей измельчать лузгу крупяных и масличных культур с минимальной энергоемкостью;

- аналитические зависимости эффективности использования питающего устройства барабанного типа с желобами, противоположные стороны которых повернуты относительно друг друга и молотков, рабочая поверхность которых имеет выступы, радиусы от вершин которых до оси подвеса равны;

- результаты экспериментальных исследований влияния конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки на процесс измельчения лузги крупяных и масличных культур.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Материалы и результаты исследования по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на: международных и всероссийских конференциях, УМНИК (Саратов, 2015 г.); «Конкурс научно-инновационных работ среди студентов, аспирантов и молодых ученых» (Саратов, 2016 г.); конференция аспирантов «Иностранный язык как средство научной коммуникации» (Саратов 2016 г.); конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов по итогам научно-исследовательской, учебно-методической и воспитательной работы за 2015 – 2017 гг. ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ; Всероссийская конференция «Современные проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса России» (Саратов, 2016, 2017 гг.).

На конкурсах и выставках: Всероссийский конкурс на лучшую научно-инновационную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых «Грант ректора СГАУ» (Саратов, 2016, 2017 гг.), Всероссийская агропромышленная выставка «Золотая осень» (Москва, 2017 г.).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 14 печатных работ, из которых 9 в рецензируемых научных

изданиях, рекомендованных ВАК РФ, один патент РФ на изобретение №2615001 и два патента на полезную модель №166614, №167330. Общий объем публикаций составляет 2,4 печ. л., из которых 1,3 печ. л. принадлежит лично соискателю.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 3 таблицы и 7 приложений. Список литературы включает 126 наименований, из которых 10 на иностранном языке.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Сформулированы цель и задачи исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту, а также степень достоверности и апробации результатов.

В первой главе **«Состояние вопроса. Цель и задачи исследований»** представлен анализ состояния и разработанности темы исследования. В частности, был проведен анализ способов и технических средств измельчения материалов, на основании которого было установлено, что молотковые дробилки наиболее полно удовлетворяют требованиям по измельчению лузги. Так же была представлена классификация и анализ молотковых дробилок, их основных рабочих органов и питающих устройств.

Комплексным изучением процесса измельчения материалов молотковыми дробилками занимались исследователи: Мельников С.В., Сыроватка В.И., Золотарев С.В., Смирнов Н.М., Сергеев Н.С., Рейнерс Е., Эбергардт В и др.

Как показывает анализ, что процесс измельчения лузги крупяных и масличных культур сложное и недостаточно изученное явление.

Выявлено, что недостатком некоторых предлагаемых учеными конструкций молотковых дробилок является то, что одновременно с улучшением качественных показателей готового продукта, усложняется конструкция машины, что увеличивает ее стоимость, предъявляет высокие требования к ее ремонту и обслуживанию.

Таким образом, на основании проведенного анализа существующих конструкций молотковых дробилок и факторов, влияющих на процесс измельчения лузги крупяных и масличных культур, был сделан вывод о возможности усовершенствования рабочего процесса молотковой дробилки и обоснования параметров ее работы.

Лузга проса, гречихи и подсолнечника представляет собой лепесткообразную форму, с различными физико-механическими свойствами, представленными в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические и аэродинамические свойства лозги

Параметры \ Материал	Лозга подсолнечника	Лозга гречихи	Просьяная лозга
Геометрические параметры, мм:			
- длина	7,1-14,8	4,2-6,2	1,8-3,2
- ширина	5,2-10,3	2,8-3,7	1,5-2,0
- толщина	3,3-4,2	0,13-0,18	0,1-0,13
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	85-140	160-195	200-270
Влажность, %	11,6-17,0	11,6-17,0	11,6-17,0
Угол естественного откоса, град.	55	50	48
Скорость витания, м/с	1,54-1,76	1,3-1,63	1,1-2,0
Коэффициент парусности, м <sup>-1</sup>	3,16-4,13	3,69-5,8	2,45-8,1

Во второй главе «Теоретические исследования процесса измельчения лозги в молотковой дробилке» обоснована перспективная конструктивно-технологическая схема молотковой дробилки (рисунок 1).

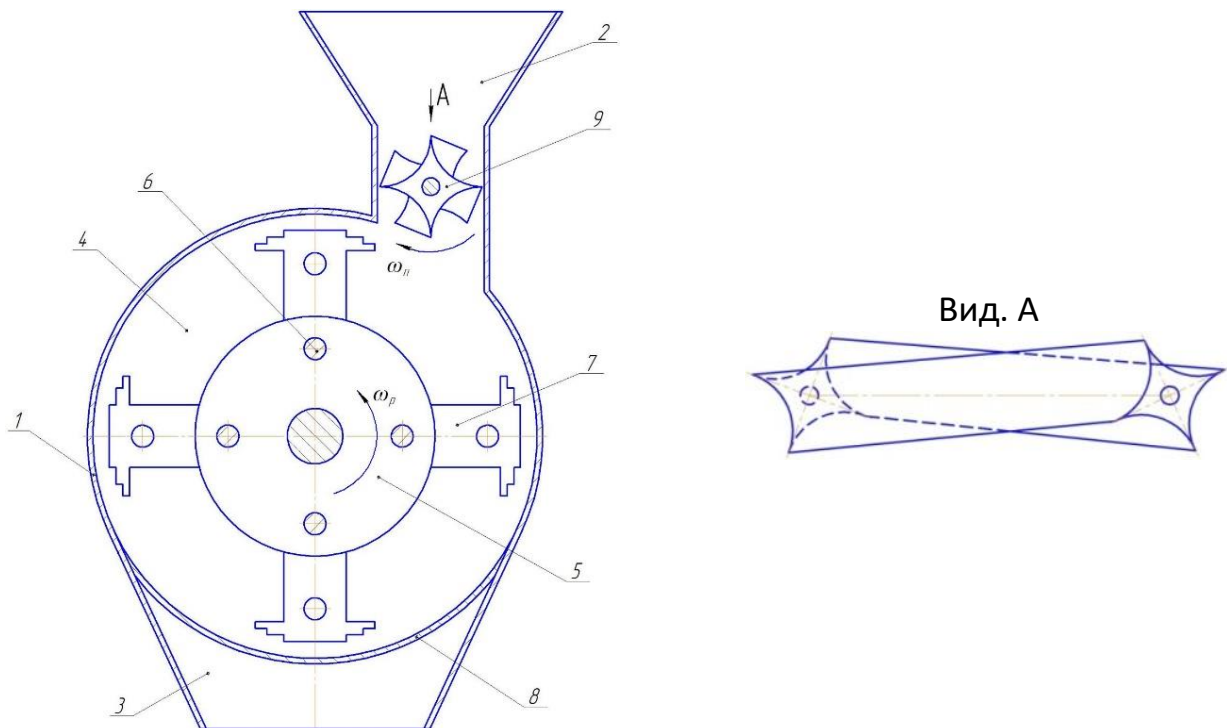


Рисунок 1 – Молотковая дробилка:

1 – цилиндрический корпус; 2 – загрузочный бункер; 3 – выгрузное окно; 4 – дробильная камера; 5 – ротор; 6 – палец; 7 – молоток; 8 – решето; 9 – питающее устройство

Для обеспечения стабильности потока измельчаемого материала используется питающее устройство (рисунок 1, вид А), представляющее собой цилиндр с четырьмя желобами, противоположные стороны которого повернуты относительно друг друга.

Определена производительность предлагаемой конструкции питающего устройства:

$$Q_{\text{п}} = 60l_{\text{п}} R_{\text{п}}^2 \left( \frac{\pi\varphi}{180^\circ} - \sin\varphi \right) z_{\text{ж}} n_{\text{п}} \rho K_{\text{в}} K_{\text{п}}, \quad (1)$$

где  $l_n = 1,2l$ ,  $l$  - длина вала ротора питающего устройства, м;  $l_n$  - рабочая длина лопасти питающего устройства, м;  $R_n$  - радиус питающего устройства, м;  $\varphi$  - центральный угол желоба питающего устройства, град;  $z_{ж}$  - количество желобов;  $n_n$  - частота вращения вала питающего устройства,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $\rho$  - насыпная плотность измельчаемого материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $K_v$  - коэффициент заполнения объема желоба питающего устройства, характеризующего степень использования объема желоба,  $K_v = 0,97$ ;  $K_n$  - коэффициент подпрессовывания измельчаемого материала, зависящего от вида измельчаемого материала,  $K_n = 1,5 \dots 3$ .

Основными параметрами, влияющими на процесс подачи лужки к рабочим органам молотковой дробилки, являются: скорость ввода массы материала к рабочим органам дробилки, угол ввода и траектория движения массы измельчаемого материала после схода с лопасти питающего устройства.

Рассмотрим момент начала процесса разгрузки массы  $m$  измельчаемого материала с лопасти питающего устройства (рисунок 2).

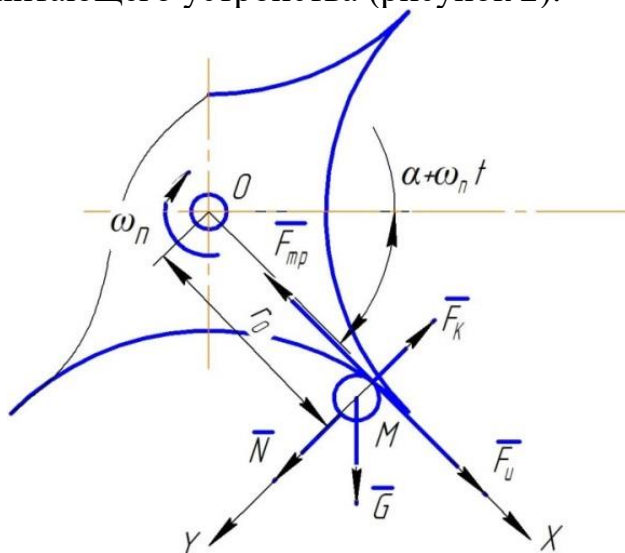


Рисунок 2 – Процесс разгрузки измельчаемого материала с лопасти питающего устройства

В данный момент элемент массы измельчаемого материала движется в вертикальной плоскости лопасти и на него будут действовать следующие силы:  $\overline{G} = m\overline{g}$  - сила тяжести;  $\overline{F}_u = m\omega_n^2 \cdot \overline{r}_0$  - центробежная сила инерции;  $\overline{F}_K = 2m\omega_n \overline{v}_{отн}$  - Кориолисова сила инерции;  $\overline{F}_{mp} = fN$  - сила трения ( $\omega_n$  - угловая скорость вала питающего устройства;  $r_0$  - расстояние от оси вращения до частицы измельчаемого материала;  $f$  - коэффициент трения массы измельчаемого материала о лопасти питающего устройства;  $m$  - масса порции материала).

Условие сбрасывания частиц измельчаемого материала с лопасти питающего устройства имеет вид:

$$\sum F_x \geq F_{тр}, \quad (2)$$

где  $\sum F_x$  - сумма всех сил, действующих на частицу измельчаемого материала вдоль оси лопасти питающего устройства.



Представим условие (2) в развернутом виде, получим:

$$m\omega_n^2 r_0 + mg \sin(\alpha + \omega_n t) \geq f(2m\omega_n v_{отн} - mg \cos(\alpha + \omega_n t)). \quad (3)$$

После преобразования выражения (3) получим выражение для определения угла поворота лопасти желоба, при котором происходит полная его разгрузка от массы измельчаемого материала:

$$\alpha = \arcsin \left[ \frac{\cos \psi (\omega_n^2 r_0 - 2f\omega_n v_{отн})}{g} \right] + \psi, \quad (4)$$

где  $\psi$  - угол трения массы измельчаемого материала о лопасть желоба питающего устройства, град.

Из выражения (4) видно, что угол разгрузки лопасти питающего устройства зависит от угловой скорости вращения вала питающего устройства  $\omega_n$ , коэффициента трения массы измельчаемого материала о лопасть желоба питающего устройства  $f$  и угол трения массы измельчаемого материала о лопасть желоба питающего устройства  $\psi$ .

Для определения относительной скорости  $v_{отн}$  движения частиц материала, составим дифференциальное уравнение движения частиц материала по поверхности лопасти желоба, которое с учетом всех действующих на нее внешних сил имеет вид:

$$m\bar{a} = \bar{F}_u + \bar{F}_k + \bar{G} + \bar{F}_{mp}. \quad (5)$$

После преобразования уравнение (5) можно записать в виде:

$$ma = m\omega_n^2 \cdot r_0 + mg \sin(\alpha + \omega_n t) - 2fm\omega_n \cdot v_{отн} + fmg \cos(\alpha + \omega_n t). \quad (6)$$

Уравнение (6) составлено из условий, при которых движение массы измельчаемого материала по лопасти питающего устройства будет происходить в вертикальной плоскости, то есть в этом случае имеет место плоская система сил.

После решения уравнения (6), получим формулу для вычисления относительной скорости движения частиц материала по лопасти питающего устройства:

$$v_{отн} = \dot{r} = C_1 k_1 e^{k_1 t} + C_2 k_2 e^{k_2 t} + A\omega_n \cos(\alpha + \omega_n t) - B\omega_n \sin(\alpha + \omega_n t). \quad (7)$$

На массу измельчаемого материала  $m$ , движущуюся после схода с лопасти желоба питающего устройства, действуют две силы: сила тяжести  $G = mg$  и сила аэродинамического сопротивления среды  $F_c = k_n v_{отн}^2$ .

Дифференциальное уравнение движения массы материала после схода с лопасти питающего устройства можно записать в виде:

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = mg - k_n \left( \frac{ds}{dt} \right)^2. \quad (8)$$

Решением уравнения (8) является закон движения массы измельчаемого материала к рабочим органам молотковой дробилки:

$$s = \frac{m}{k_n} \ln \frac{e^{\sqrt{\frac{k_n g}{m}} t} + e^{-\sqrt{\frac{k_n g}{m}} t}}{2}, \quad (9)$$

где  $s$  - траектория движения массы измельчаемого материала к рабочим органам молотковой дробилки, м;  $k_n$  - коэффициент парусности, для лузги подсолнечника  $k_n = 3,16 - 4,13 \text{ м}^{-1}$ , для лузги гречихи  $k_n = 3,69 - 5,8 \text{ м}^{-1}$ , для лузги проса  $k_n = 2,45 - 8,1 \text{ м}^{-1}$ ;  $t$  - время полета массы измельчаемого материала к рабочим органам молотковой дробилки, с;  $g$  - ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Для повышения эффективности технологического процесса измельчения лузги была разработана конструкция молотка (рисунок 3) с тремя выступами, радиусы от вершин которых до оси подвеса равны, т.е.  $r_0 = r_1 = r_2$ .

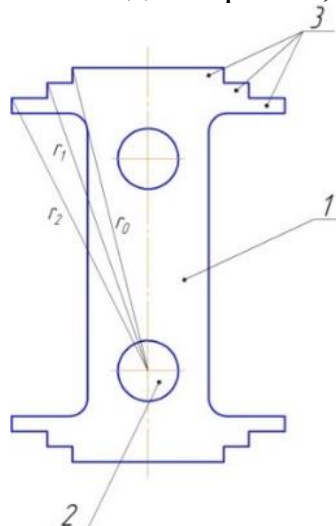


Рисунок 3 – Молоток:

1 – пластина молотка; 2 – отверстия для крепления молотка; 3 – выступы

Так как предлагаемая нами конструкция молотка (рисунок 3) имеет выступы, радиусы от вершин которых до оси подвеса равны, следовательно, энергия удара каждым из выступов будет одинаковая, тогда можно записать выражение для определения кинетической энергии удара молотка всеми тремя выступами:

$$T_{уд} = z_B \frac{m' m_M}{m' + m_M} \cdot \frac{v_{уд}^2}{2}, \quad (10)$$

где  $T_{уд}$  – кинетическая энергия удара молотка о массу измельчаемого материала, Дж;  $z_B$  – количество выступов на рабочей поверхности молотка;  $m'$  - масса порции материала, участвующая в соударении с молотком, кг;  $m_M$  – масса молотка, кг;  $v_M$  – окружная скорость молотка, м/с.

Как видно из выражения (10), энергия удара предлагаемой конструкцией молотка по сравнению с молотком прямоугольной формы увеличивается в 1,5 раза, так как  $z_B = 3$ , за счет чего можно увеличить производительность молотковой дробилки и снизить энергоемкость процесса измельчения.

Для обеспечения оптимальных условий работы шарнирно-подвешенные на роторе молотки, во время работы должны находиться в радиальном положении. Для этого изобразим молоток в положении, отклоненном от радиального на угол  $\alpha$ , и приведем все основные силы, взаимодействующие с ним во время работы (рисунок 4).

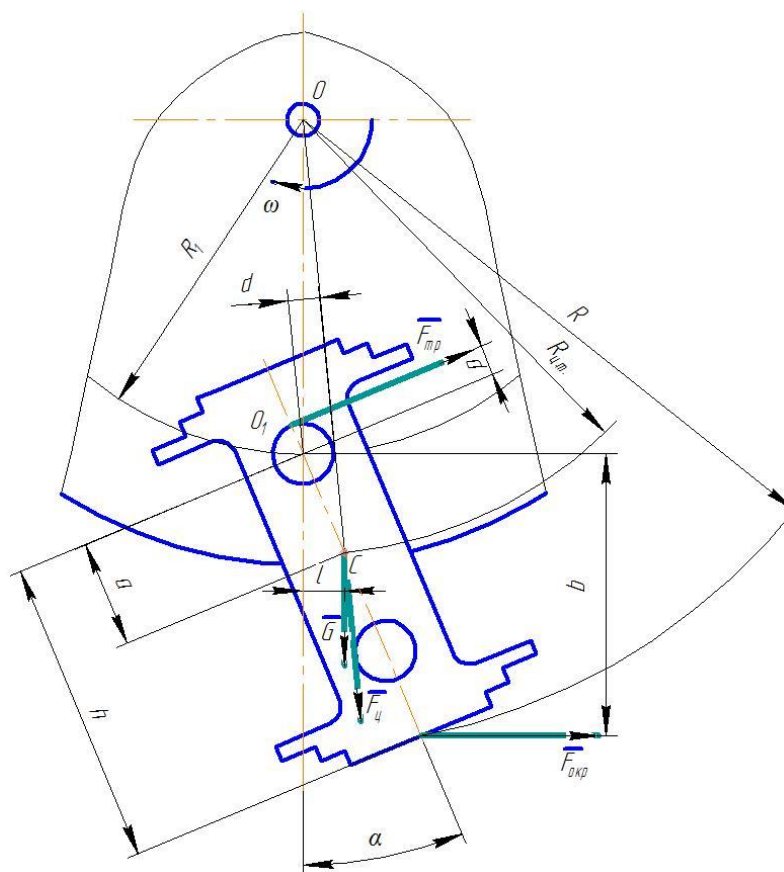


Рисунок 4 – Схема действия сил на молоток во время его работы

Для представленной схемы составим уравнение моментов:

$$F_{\text{окр}} b = Gl + F_{\text{тр}} p + F_{\text{ц}} d, \quad (11)$$

где  $F_{\text{окр}}$  – окружная сила, действующая со стороны молотка на материал, равная силе сопротивления среды  $H$ ;  $b$  – плечо окружной силы, м;  $G$  – сила тяжести молотка, Н;  $l$  – плечо силы тяжести, м;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения молотка относительно поверхности шарнира, Н;  $p$  – плечо силы трения, м;  $F_{\text{ц}}$  – центробежная сила инерции, Н;  $d$  – плечо центробежной силы инерции, м.

После преобразования выражения (11) получим:

$$\frac{k_c P h \cos \alpha}{R \omega_p z_M} = m_M g a \sin \alpha + f m_M \omega_p^2 R_{\text{ц.т.}} p + m_M \omega_p^2 R_1 a \sin \alpha, \quad (12)$$

где  $k_c$  – коэффициент сопротивления движения молотка в воздушно-продуктовом слое лужги,  $k_c = 2,5 \dots 3$ ;  $P$  – потребляемая мощность привода ротора, Вт;  $h$  – расстояние от оси шарнира до точки приложения силы  $F_{\text{окр}}$ , м;  $\alpha$  – угол отклонения молотка, град;  $R$  – расстояние от оси вращения вала ротора до точки приложения силы  $F_{\text{окр}}$ , м;  $\omega_p$  – угловая скорость ротора с молотками,  $\text{с}^{-1}$ ;  $z_M$  – количество молотков;  $m_M$  – масса молотка, кг;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $a$  – расстояние от оси шарнира молотка до центра тяжести, м;  $f$  – коэффициент трения в шарнире ( $f = 0,15$ );  $R_{\text{ц.т.}}$  – расстояние от оси вращения ротора до центра тяжести молотка, м;  $R_1$  – расстояние от оси вращения вала ротора до оси шарнира молотка, м.

При условии, когда молоток не будет отклонен от радиального положения, т.е.  $\alpha = 0$ , необходимо выполнение следующего условия:

$$\frac{k_c Ph}{R \omega_p z_M} < f m_M \omega_p^2 R_{ц.т.} p,$$

откуда

$$\omega_p \geq \sqrt[3]{\frac{k_c Ph}{f R z_M m_M R_{ц.т.} p}}. \quad (13)$$

$$m_M = m_{\min} \geq \frac{k_c Ph}{f R z_M \omega_p^3 R_{ц.т.} p}. \quad (14)$$

Выполнение условий (13) и (14) позволит обеспечить устойчивое равновесие молотка, при котором он не будет отклоняться от радиального положения.

Производительность молотковой дробилки при измельчении луги определяется по формуле:

$$Q = 60 k_{кр} k_{ф.м.} k_{э} \rho D_{р.м.}^2 L_p n_p, \quad (15)$$

где  $k_{кр}$  – коэффициент кратности удара,  $k_{кр} = 2.5 \dots 3$ ;  $k_{э}$  – эмпирический коэффициент, зависящий от типа и размеров ячеек решета, для гладких решет с диаметром отверстий 3 мм  $k_{э} = (1,3 \dots 1,7) \cdot 10^{-4}$  (по С.В. Мельникову);  $k_{ф.м.}$  – коэффициент, зависящий от формы рабочей поверхности молотков,  $k_{ф.м.} = 1,2 \dots 1,5$ ;  $\rho$  – плотность измельчаемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $D_{р.м.}$  – диаметр ротора по окружности концов молотков при рабочем положении, м;  $L_p$  – длина ротора, м;  $n_p$  – частота вращения ротора, мин<sup>-1</sup>.

Энергоемкость рабочего процесса молотковой дробилки с учетом степени измельчения и качества готового продукта рассчитывается по формуле:

$$E = \frac{PK_K}{Q\lambda}, \quad (16)$$

где  $P$  – мощность, расходуемая на рабочий процесс молотковой дробилки с учетом затрат энергии на весь технологический процесс, кВт;  $Q$  – производительность, кг/ч;  $\lambda$  – степень измельчения;  $K_K$  – коэффициент качества готового продукта, характеризующий отношение недоизмельченной и переизмельченной массы материала к общей массе готового продукта.

В третьей главе **«Программа и методика экспериментальных исследований»** в соответствии с поставленными задачами изложена программа и методика экспериментальных исследований в лабораторных и производственных условиях.

С целью проведения экспериментальных исследований на кафедре «Механика и инженерная графика» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова была изготовлена лабораторная установка с продольным и поперечным расположением питающего устройства относительно вала ротора с молотками (рисунок 5).

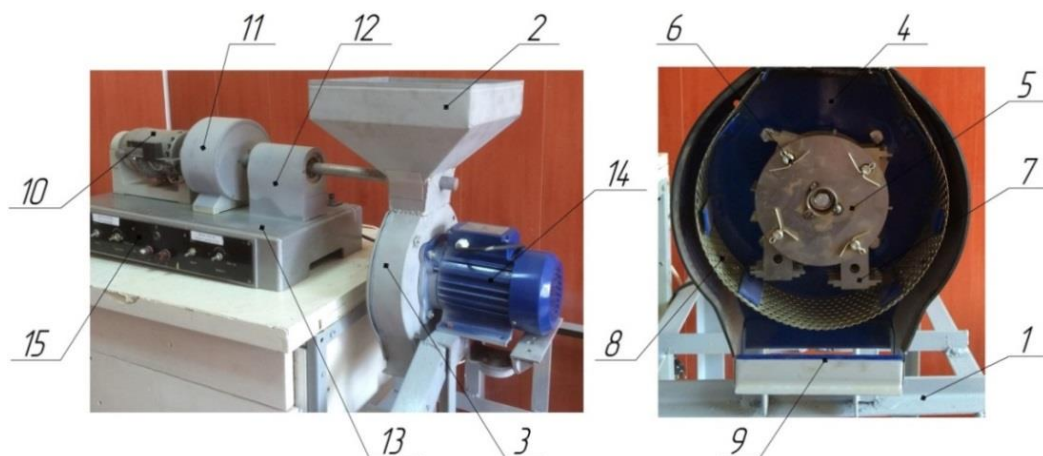


Рисунок 5 – Общий вид лабораторной установки

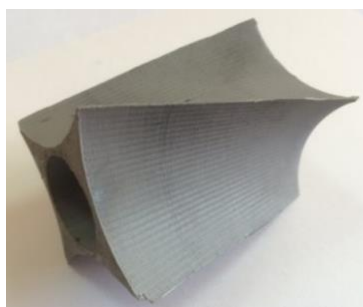


Рисунок 6 – Питающее устройство

Молотковая дробилка размещена на раме 1 и состоит из загрузочного бункера 2, корпуса 3 с дробильной камерой 4, внутри которой установлены ротор 5 с шарнирно-закрепленными на его осях 6 молотками 7, решето 8 и выгрузного окна 9. В горловине загрузочного бункера установлено питающее устройство (рисунок 6), имеющее индивидуальный привод от электродвигателя 10 через редуктор 11 и подшипниковую опору 12, установленных на станине 13. Привод вала ротора 5 с молотками осуществляется от электродвигателя 14, закрепленного на торцевой стенке корпуса дробильной камеры.

Лабораторная установка выполнена с возможностью изменения частоты вращения вала питающего устройства и вала ротора 5 с молотками при помощи регуляторов, установленных на панели управления 15.

Рабочий процесс измельчения лузги крупяных и масличных культур протекает следующим образом. В загрузочный бункер 2 засыпается измельчаемый материал, откуда посредством питающего устройства против направления вращения вала ротора 5 подается в дробильную камеру 4. В дробильной камере 4 измельчаемый материал подвергается ударному воздействию молотков 7 и получает частичное разрушение. Кроме разрушения от удара молотками 7 частицы измельчаются при ударах о поверхность решета 8, а также в результате взаимодействия друг с другом. Измельченный продукт выводится из дробильной камеры через выгрузное отверстие 9.

Для проведения экспериментальных исследований были отобраны следующие виды измельчаемого материала: лузга подсолнечника, гречихи и проса, как наиболее распространенные отходы сельскохозяйственного

производства. Измельчаемый материал отбирался в производственных цехах после шелушения соответствующего вида культуры.

Для обоснования конструктивно-режимных и технологических параметров рабочего процесса молотковой дробилки был выбран план двухфакторного эксперимента. По результатам опытов строились уравнения регрессии проверка о значимости и не значимости которых проверялась по критерию Фишера.

В производственных испытаниях измельчению подвергали лузгу подсолнечника. В качестве образца для сравнения использовалась серийная молотковая дробилка ИЗКБ-1, применяемая в личных подсобных и малых фермерских хозяйствах для измельчения зерна. На дробилке ИЗКБ-1 для сравнительных испытаний были установлены новые молотки и питающее устройство.

Величину часовой производительности устанавливали методом взятия пробы за определенный период работы. Моменты отбора пробы фиксировались секундомером. Отобранную пробу взвешивали на электронных весах марки ВЛКТ-500М. Все опыты повторялись трехкратно.

При выполнении работы, компьютерная обработка полученных данных проводилась при помощи прикладных программ: STATISTICA 12.7 и Microsoft Excel 2010.

В четвертой главе «**Результаты экспериментальных исследований рабочего процесса молотковой дробилки**» представлены результаты экспериментальных исследований и их анализ.

Для обеспечения технологического процесса измельчения, поток материала, выходящий из питающего устройства должен обладать необходимой равномерностью. Анализ зависимости неравномерности подачи измельчаемого материала  $\Delta q$  от частоты вращения вала питающего устройства (рисунок 7) показывает, что предлагаемая конструкция питающего устройства обеспечивает равномерность потока измельчаемого материала к рабочим органам молотковой дробилки при меньших частотах вращения по сравнению с питателем с желобами прямой формы.

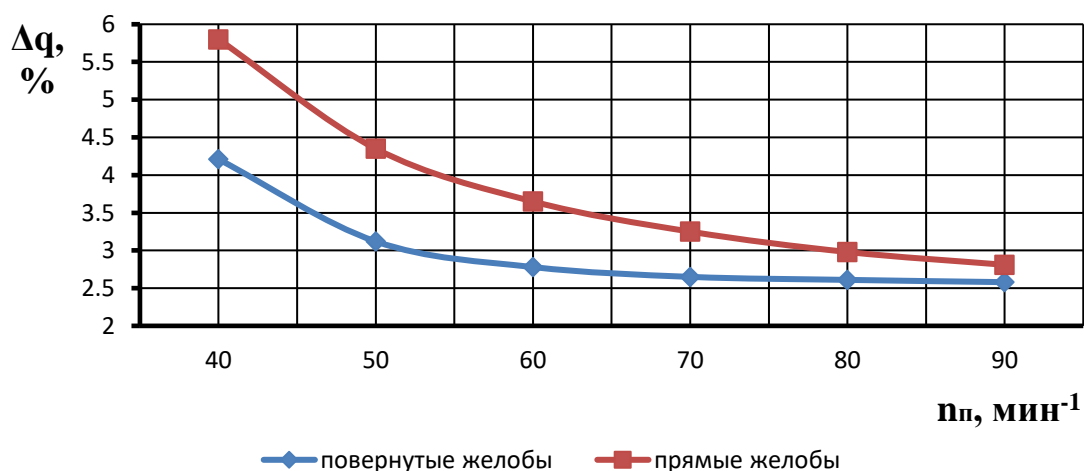


Рисунок 7 – Зависимость неравномерности подачи измельчаемого материала  $\Delta q$  от частоты вращения вала питающего устройства  $n_p$  (лузга гречихи)

Влияние способа расположения питающего устройства относительно вала ротора представлены на рисунках 8, 9.

Как видно из представленных зависимостей, продольное расположение питающего устройства обеспечивает увеличение величины подачи измельчаемого материала на 8 ... 12 %, а также снижение энергоемкости процесса подачи на 7 ... 10 %, в сравнении с поперечным, при частоте вращения вала питающего устройства  $70 \text{ мин}^{-1}$ .

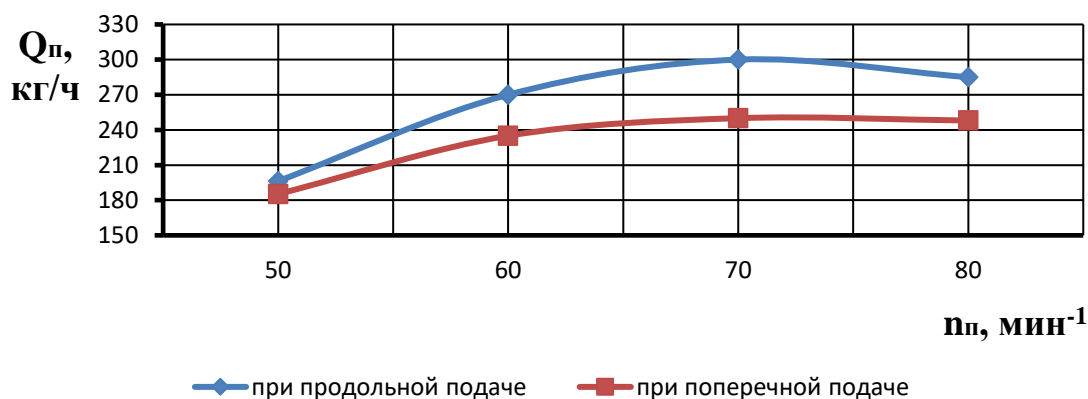


Рисунок 8 – Зависимость величины подачи  $Q_{п}$  измельчаемого материала от частоты вращения вала питающего устройства  $n_{п}$  при  $D_{п} = 0,07 \text{ м}$  (лузга гречихи)

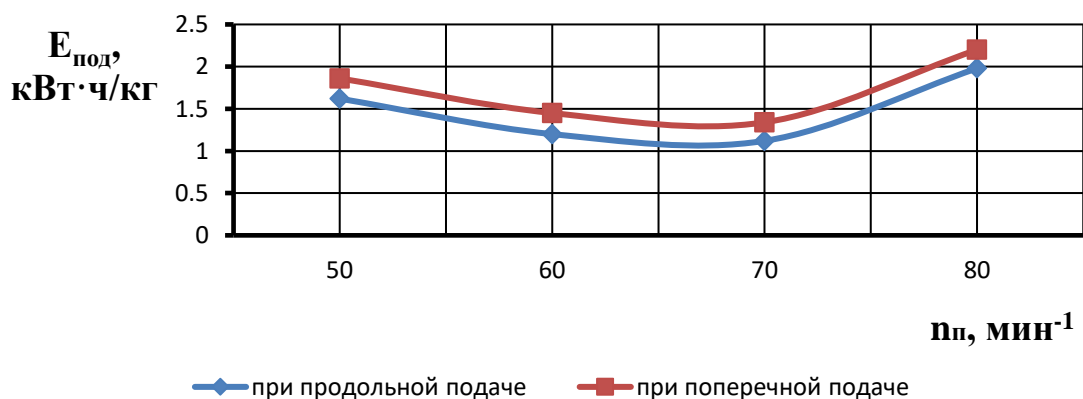


Рисунок 9 – Зависимость энергоемкости процесса подачи  $E_{под}$  от частоты вращения вала питающего устройства  $n_{п}$  при  $D_{п} = 0,07 \text{ м}$  (лузга гречихи)

Так же из зависимостей 8 и 9 видно, что с увеличением частоты вращения вала питающего устройства более  $70 \text{ мин}^{-1}$  происходит снижение величины подачи измельчаемого материала за счет уменьшения заполнения желобов питающего устройства, что влечет за собой увеличение энергоемкости процесса подачи.

На производительность молотковой дробилки, кроме влияния физико-механических свойств и величины подачи измельчаемого материала, также оказывают значительное влияние и рабочие органы дробилки.

На рисунке 10 представлены зависимости производительности молотковой дробилки от окружной скорости молотков, которые показывают, что молотки со ступенчатой формой рабочей поверхности обеспечивают производительность

молотковой дробилки на 20 % больше по сравнению с прямоугольными при окружной скорости молотков, равной 40 м/с.

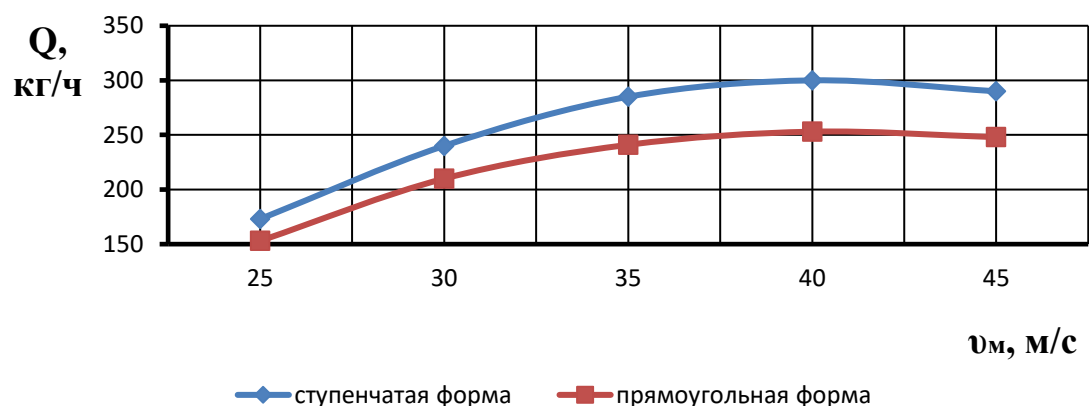


Рисунок 10 – Зависимость производительности Q молотковой дробилки от окружной скорости молотков  $v_m$  (лузга гречихи)

Проведение экспериментальных исследований позволило установить влияние окружной скорости молотков на модуль помола готового продукта (рисунок 11).

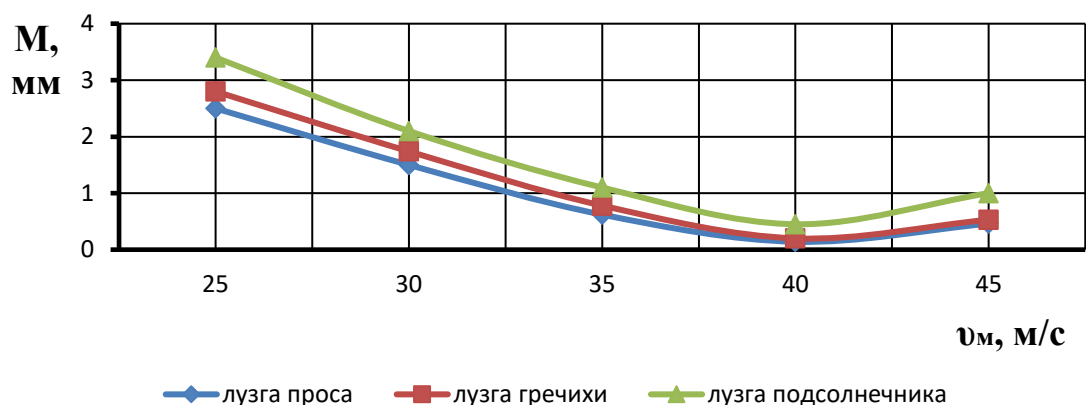


Рисунок 11 – Зависимость модуля помола M готового продукта от окружной скорости молотков  $v_m$

Анализ зависимости модуля помола готового продукта от окружной скорости молотков показывает, что при достижении оптимальной окружной скорости молотков 40 м/с модуль помола уменьшается, дальнейшее увеличение окружной скорости ведет к увеличению модуля помола из-за сильного вентиляционного воздействия на измельчаемую массу. Экспериментальная молотковая дробилка обеспечивает мелкий помол 0,15 ... 0,4 мм.

По результатам проведенных экспериментальных исследований, было получено уравнение регрессии (18) и соответствующая ему графическая зависимость производительности молотковой дробилки от величины подачи измельчаемого материала и окружной скорости молотков (рисунок 12).

$$Q = 291,915 + 0,449 \cdot Q_{II} - 8,267 \cdot v_m + 0,0004 \cdot Q_{II}^2 - 0,007 \cdot Q_{II} \cdot v_m + 0,14 \cdot v_m^2 \quad (18)$$



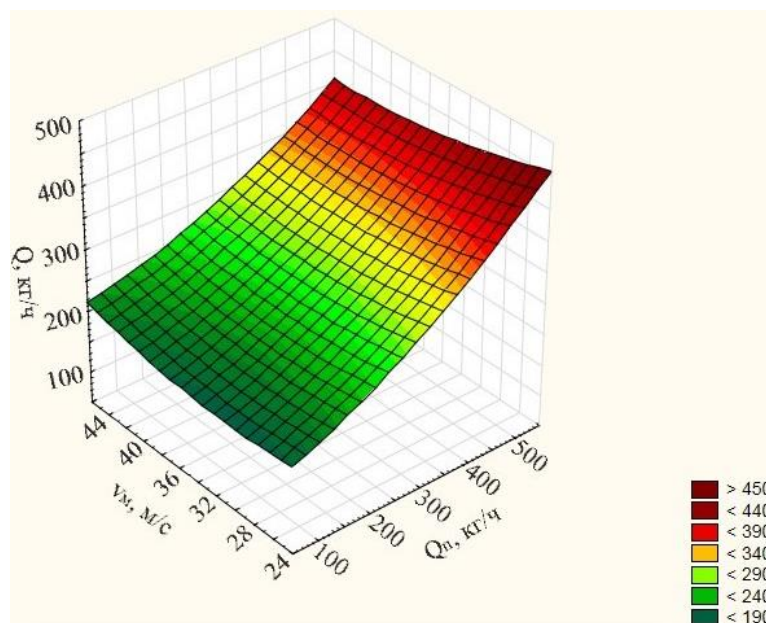


Рисунок 12 – Зависимость производительности  $Q$  молотковой дробилки от величины подачи  $Q_n$  измельчаемого материала и окружной скорости молотков  $v_m$

Как видно из графика (рисунок 12) при значениях величины подачи измельчаемого материала  $Q_n$  равном 300 кг/ч и окружной скорости молотков  $v_m$  40 м/с достигается производительность молотковой дробилки 300 кг/ч.

По результатам экспериментальных исследований, было получено уравнение регрессии (19) и соответствующая ему графическая зависимость энергоемкости процесса измельчения лузги крупяных и масличных культур от величины подачи измельчаемого материала и окружной скорости молотков (рисунок 13).

$$E = 1,4865 - 0,0008 \cdot Q_n - 0,006 \cdot v_m + 3,6792E-6 \cdot Q_n^2 - 3,7716E-5 \cdot Q_n \cdot v_m + 0,0002 \cdot v_m^2 \quad (19)$$

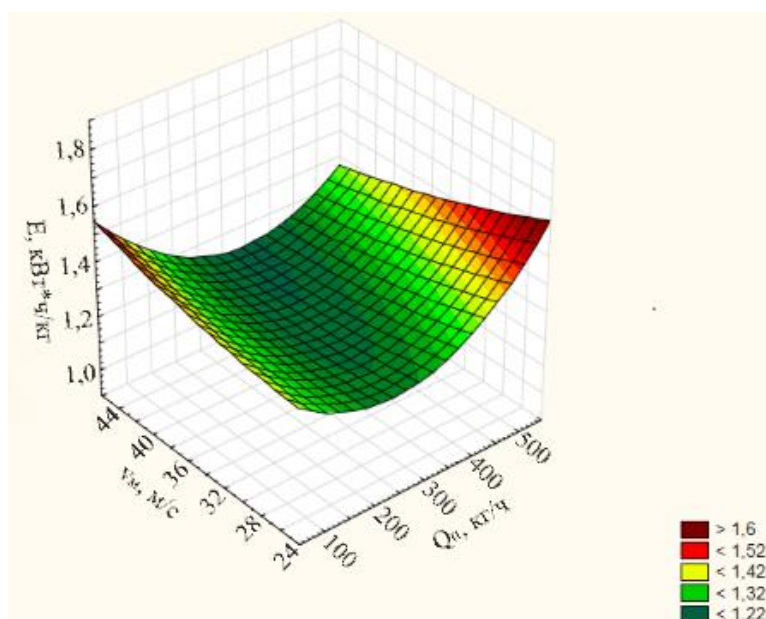


Рисунок 13 – Зависимость энергоемкости  $E$  процесса измельчения лузги от величины подачи  $Q_n$  измельчаемого материала и окружной скорости молотков  $v_m$

Как видно из графика (рисунок 13), энергоёмкость процесса измельчения при малой величине подачи измельчаемого материала  $Q_{п}$  до 250 кг/ч увеличивается, но с увеличением подачи измельчаемого материала к рабочим органам молотковой дробилки энергоёмкость начинает уменьшаться, поскольку подводимая мощность к ротору дробилки остается постоянной. При подаче 300 кг/ч достигается минимальное значение энергоёмкости 1,23 ... 1,35 кВт·ч/кг. Дальнейшее увеличение величины подачи приводит к увеличению энергоёмкости процесса измельчения и при подаче более 300 кг/ч молотковая дробилка работает в режиме завала.

На рисунках 14 и 15 представлены теоретическая и экспериментальная зависимости влияния величины подачи измельчаемого материала и окружной скорости молотков на производительность молотковой дробилки.

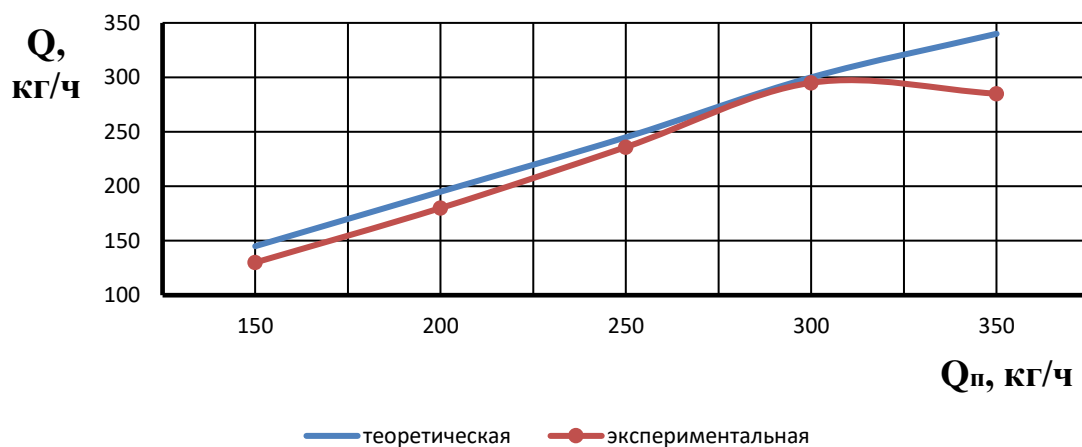


Рисунок 14 – Зависимость производительности  $Q$  молотковой дробилки от величины подачи  $Q_{п}$  измельчаемого материала

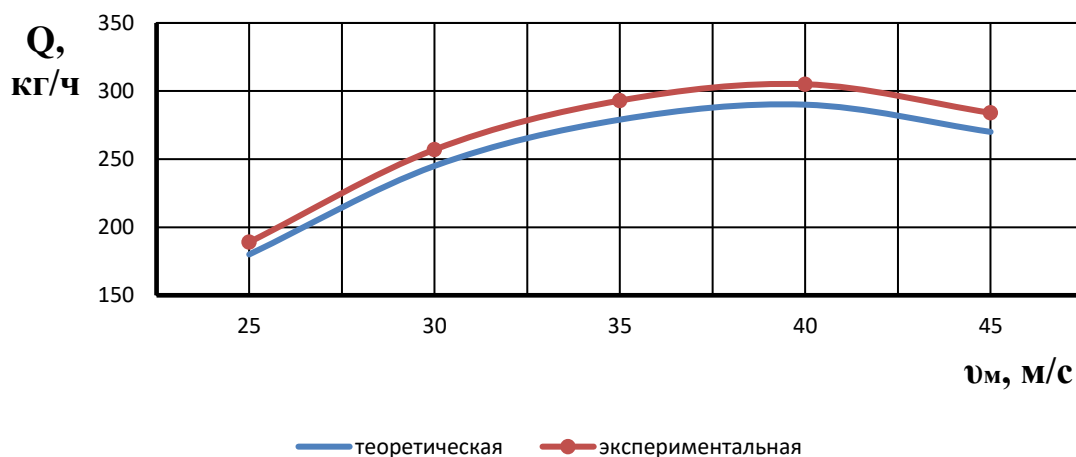


Рисунок 15 – Зависимость производительности  $Q$  молотковой дробилки от окружной скорости молотков  $v_{м}$

На рисунках 16 и 17 представлены теоретическая и экспериментальная зависимости влияния величины подачи измельчаемого материала и окружной скорости молотков на энергоёмкость процесса измельчения.

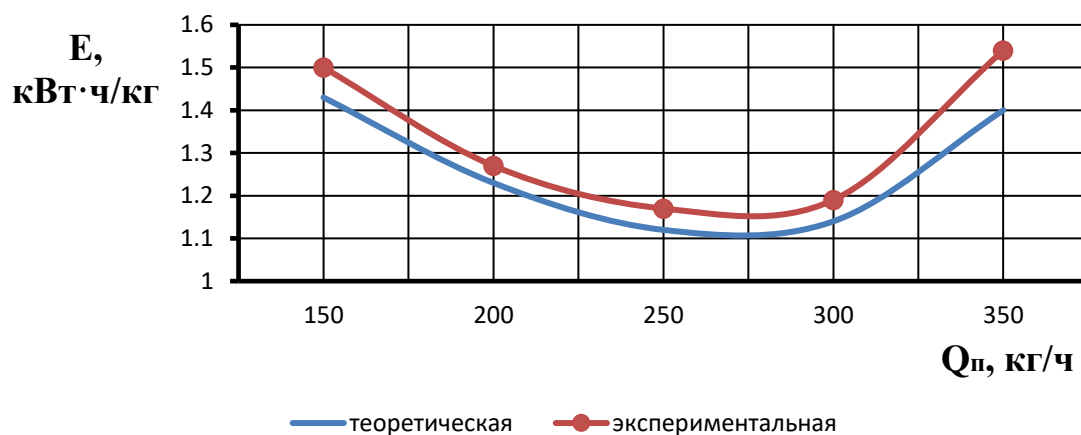


Рисунок 16 – Зависимость энергоемкости  $E$  процесса измельчения от величины подачи  $Q_{п}$  измельчаемого материала

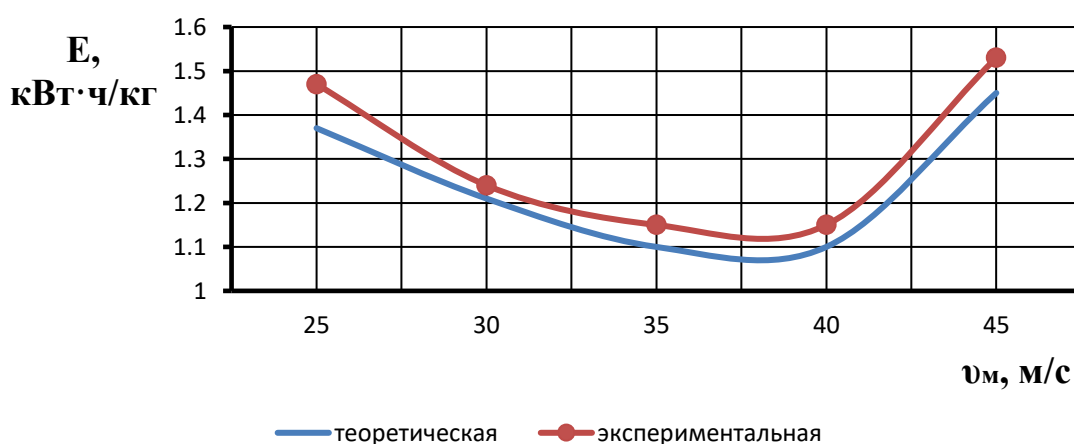


Рисунок 17 – Зависимость энергоемкости  $E$  процесса измельчения от окружной скорости молотков  $v_{м}$

Анализируя зависимости (рисунок 14 – 17) можно сделать вывод, что производительность и энергоемкость молотковой дробилки от подачи измельчаемого материала и окружной скорости молотков изменяются по нелинейной закономерности и согласуются на основании критерия Пирсона с доверительной вероятностью 0,95.

В пятой главе **«Результаты производственных испытаний и экономическая эффективность от внедрения молотковой дробилки»** представлены результаты производственных испытаний и экономическая оценка результатов исследования.

Производственные испытания молотковой дробилки проводились на сельскохозяйственных предприятиях: ООО «Марс-07» (г. Саратов), ЗАО «Алтайская крупа» (Алтайский край, Советский р-н, с. Советское), КФХ «Демкин А.П.» (Саратовская обл., Екатериновский р-н, с. Упоровка).

На одну тонну измельченной массы фракция требуемой крупности в среднем составила 954 кг в предлагаемой и 720 кг в ИЗКБ-1. Анализ средних показателей дробилок показал, что частицы размером менее 0,35 мм, в

предлагаемой дробилке составляют 2,5 %, что в 4,5 раза меньше, чем в ИЗКБ-1. Фракция с частицами требуемого размера в среднем составляет 97,5 % против 72 % в пользу предлагаемой дробилки, а недоизмельченные частицы присутствовали только в ИЗКБ-1. Экономические показатели эффективности молотковой дробилки представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Экономические показатели эффективности использования молотковой дробилки по сравнению с ИЗКБ-1

№ п/п	Основные показатели	Молотковые дробилки	
		ИЗКБ-1 (базовый вариант)	Молотковая дробилка (новый вариант)
1	Годовая загрузка дробилки, т	1760	1760
2	Установленная мощность, кВт	30	21
3	Производительность, кг/ч	250	300
4	Число обслуживающего персонала, чел.	1	1
5	Себестоимость электроэнергии на единицу продукции, руб/кВт·ч	56,05	41,4
6	Годовой экономический эффект, руб.	-	45600
7	Срок окупаемости, лет	-	0,3

Анализ приведенных данных таблицы 2 позволяет сделать вывод, что при использовании в сельскохозяйственном производстве усовершенствованной конструкции молотковой дробилки: производительность увеличилась на 20%, расход электроэнергии снижен на 30%, годовой экономический эффект составляет 45600 руб., срок окупаемости - 0,3 года.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе решена актуальная научно-производственная задача повышения производительности и снижения энергоемкости процесса измельчения лужги крупяных и масличных культур путем применения усовершенствованной конструкции молотковой дробилки.

2. Проведенный анализ существующих конструкций сельскохозяйственных измельчающих машин показал, что они мало применимы и энергоемки при измельчении лужги крупяных и масличных культур. В связи с чем, была разработана конструктивно-технологическая схема молотковой дробилки, отличающаяся тем, что в ее конструкции используется молотки, рабочая поверхность которого выполнена в виде внешних трехступенчатых прямоугольных выступов, радиусы от вершин которых до оси подвеса равны, и питающим устройством, выполненным в виде барабана с четырьмя желобами, противоположные стороны которого повернуты относительно друг друга (Патенты №№ 166614, 167330, 2615001).

3. Получены теоретические зависимости, позволяющие определить влияние конструктивно-режимных и технологических параметров работы молотковой дробилки на производительность и энергоемкость процесса измельчения:

выражение (1) для определения производительности предлагаемой конструкции питающего устройства, (4) для определения угла поворота лопасти желоба, при котором происходит его полная разгрузка от массы измельчаемого материала, (9) для определения относительной скорости движения массы измельчаемого материала по лопасти питающего устройства, (10) закон движения массы измельчаемого материала к рабочей поверхности молотка. Получены выражения для определения кинетической энергии удара предлагаемой конструкцией молотка (11). Были получены условия, позволяющие обеспечить устойчивое равновесие молотка, при котором он не будет отклоняться от радиального положения: угловая скорость вращения ротора с молотками (14) и минимальная масса молотков (15). Были получены выражения для определения производительности молотковой дробилки (16), и энергоемкости процесса измельчения с учетом степени измельчения и качества готового продукта (17).

4. Применение питающего устройства, выполненного в виде барабана с четырьмя желобами, противоположные стороны которых повернуты относительно друг друга позволяет увеличить величину подачи измельчаемого материала на 8 ... 12 %, а также снизить энергоемкость процесса подачи на 7 ... 10 %, в сравнении с поперечным, при частоте вращения вала питающего устройства 70 мин<sup>-1</sup>.

Полученные уравнения регрессии (18), (19) позволяют определить производительность молотковой дробилки и энергоемкость процесса измельчения лужги крупяных и масличных культур при оптимальных конструктивно-режимных параметрах молотковой дробилки. Экспериментальная молотковая дробилка обеспечивает мелкий помол 0,15 ... 0,4 мм при величине подачи 300 кг/ч и окружной скорости молотков 40 м/с.

При значении диаметра барабана питающего устройства 0,07 м, и частоты вращения равной 70 мин<sup>-1</sup>, а также окружной скорости молотков, равной 40 м/с, обеспечивается производительность молотковой дробилки 300 кг/ч и соответствующая ей энергоемкость процесса 0,8 ... 1,0 кВт·ч/кг при измельчении лужги крупяных и масличных культур.

5. Производственная проверка опытного образца молотковой дробилки подтвердила, что расход электроэнергии снижается на 30%, повышается производительность на 20 % в сравнении с серийной молотковой дробилкой и получено до 98% выровненного по размеру частиц готового продукта. Годовой экономический эффект от применения предлагаемой конструкции дробилки составляет 45600 руб., срок окупаемости – 0,3 года.

### **РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ**

Разработанная молотковая дробилка может быть использована вместо широко применяемых малогабаритных молотковых дробилок, так как у нее снижен расход электроэнергии на 30%, увеличена производительность на 20% и получено до 98% выровненного по размеру частиц готового продукта.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Усовершенствовать технологический процесс измельчения лузги крупяных и масличных культур для дальнейшего использования готового продукта в качестве добавок к кормовым смесям для крупного рогатого скота и птицы, связующего компонента в дорожно-строительном производстве, различных удобрений и почвозащитных средств, сорбентов для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

### *Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. Рыбалкин, Д.А. Использование отходов переработки сельскохозяйственной продукции для производства твердого биотоплива / М.С. Елисеев, И.И. Елисеев, Д.А. Рыбалкин // Аграрный научный журнал. – 2016. – № 1. – С. 49 – 50.

2. Рыбалкин, Д.А. Разработка средств механизации по измельчению отходов переработки бакалейной группы сельскохозяйственной продукции / М.С. Елисеев, М.Г. Загоруйко, И.И. Елисеев, Д.А. Рыбалкин // Аграрный научный журнал. – 2016. – № 4. – С. 54 – 57.

3. Рыбалкин, Д.А. Обоснование процесса измельчения лузги молотковыми дробилками / М.С. Елисеев, И.И. Елисеев, Д.А. Рыбалкин // Аграрный научный журнал. – 2016. – № 6. – С. 53 – 55.

4. Рыбалкин, Д.А. Теоретическое обоснование параметров работы устройства для ориентированной подачи измельчаемого материала к рабочим органам молоткового измельчителя / М.С. Елисеев, И.И. Елисеев, Д.А. Рыбалкин // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 3. – С. 47 – 50.

5. Рыбалкин, Д.А. Перспективная схема молоткового измельчителя / М.С. Елисеев, И.И. Елисеев, Д.А. Рыбалкин // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 6. – С. 56 – 57.

6. Рыбалкин, Д.А. Анализ факторов, влияющих на эффективность процесса измельчения / М.С. Елисеев, М.Г. Загоруйко, Д.А. Рыбалкин // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 7. – С. 62 – 66.

7. Рыбалкин, Д.А. Обоснование конструктивно-кинематических параметров питающего устройства молоткового измельчителя / М.С. Елисеев, А.А. Леонтьев, А.М. Марадудин, Д.А. Рыбалкин // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 9. – С. 50 – 56.

8. Рыбалкин, Д.А. Результаты экспериментальных исследований рабочего процесса молоткового измельчителя / М.С. Елисеев, Д.А. Рыбалкин, А.В. Перетятко // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 11. – С. 48 – 51.

9. Рыбалкин, Д.А. Технико-экономическое обоснование внедрения молоткового измельчителя лузги / М.С. Елисеев, Д.А. Рыбалкин // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 12. – С.

### ***Патенты***

10. Пат. 166614 РФ, МПК В02С 13/28 Молоток дробилки / Елисеев М.С., Рыбалкин Д.А.; заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. – № 2016110503/13; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. – 2 с.

11. Пат. 167330 РФ, МПК В02С 13/286, МПК В02С 23/14 Молотковая дробилка / Елисеев М.С., Рыбалкин Д.А.; заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. – № 016113625; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. – 4 с.

12. Пат. 2615001, МПК В02С 13/00, МПК В02С 13/28 Молотковый измельчитель отходов переработки бакалейной группы сельскохозяйственной продукции / Елисеев М.С., Загоруйко М.Г., Елисеев И.И., Рыбалкин Д.А.; заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. – № 2016110300; опубл. 03.04.2017, Бюл. № 10. – 9 с.

### ***Публикации в других изданиях***

13. *Рыбалкин, Д.А.* Молотковый измельчитель отходов переработки бакалейной группы сельскохозяйственной продукции / М.С. Елисеев, Д.А. Рыбалкин // Молодые ученые Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова – агропромышленному комплексу России: сб. науч. работ / под ред. И.Л. Воротникова; ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. – Саратов, 2016. – С. 77 – 80.

14. *Рыбалкин, Д.А.* Использование отходов переработки бакалейной группы сельскохозяйственной продукции / Д.А. Рыбалкин // Современные проблемы перспективного развития агропромышленного комплекса России: сб. статей Всероссийской конф. – Саратов, Из-во «Саратовский источник», 2016. – С. 40 – 42.