

На правах рукописи



**ХАБАРОВА Виктория Валерьевна**

**РАЗРАБОТКА ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ КОРНЕПЛОДОВ  
С ОБОСНОВАНИЕМ ЕГО ПАРАМЕТРОВ  
И РЕЖИМОВ РАБОТЫ**

Специальность 05.20.01 - технологии и средства  
механизации сельского хозяйства

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Богатов Виктор Афанасьевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Юхин Геннадий Петрович**  
кандидат технических наук, доцент  
**Аюгин Петр Николаевич**

Ведущая организация: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева»

Защита состоится 25 марта 2011 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета ДМ 220.003.04 при ФГОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет» по адресу: 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34, ауд. 259/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет»

Автореферат разослан «24» февраля 2011 года и размещен на официальном сайте [www.bsau.ru](http://www.bsau.ru) ФГОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет»

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



С.Г. Мударисов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции на 2008 – 2012 г.г. определяет основные направления развития отрасли и одним из приоритетных направлений развития АПК выделяет животноводство. Развитие животноводства невозможно без создания кормовой базы, поэтому обеспеченность скота кормами приобретает первостепенное значение. Ускоренное развитие животноводства также является одной из основных задач в условиях реализации приоритетного национального проекта «Развитие АПК».

На протяжении последних лет в нашей стране систематически ухудшалась ситуация с крупным рогатым скотом. В настоящее время наблюдается сокращение количества сельскохозяйственных организаций, хотя удельный вес частных предприятий сельского хозяйства увеличился почти вдвое, в том числе и за счет животноводства. Основные причины сокращения поголовья крупного рогатого скота – недостаток и нерациональная структура кормов.

Измельчение кормов, в том числе и корнеплодов – это одна из наиболее трудоемких и энергоемких операций. Однако известные измельчители корнеплодов не отвечают современным требованиям по затратам энергии на процесс измельчения и качеству получаемого продукта. Поэтому задача разработки и создания измельчителя корнеплодов с низкой энергоемкостью процесса, способного обеспечить качество продукта измельчения, отвечающего зоотехническим требованиям, является актуальной и имеет большое значение для экономики страны.

Работа выполнена по плану НИОКР ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА» на 2006 – 2010 г.г. «Разработка средств механизации и технического обслуживания энерго- и ресурсосберегающих технологий в различных процессах производства и переработки продукции сельского хозяйства» (регистрационный номер 01.200.600147).

**Цель исследования.** Снижение энергоемкости процесса измельчения корнеплодов посредством разработки измельчителя с вибрирующими ножами и обоснования его оптимальных параметров и режимов работы при сохранении определяемого зоотехническими требованиями качества готового продукта.

**Объект исследования.** Технологический процесс измельчения корнеплодов с применением вибрации ножей измельчающего аппарата.

**Предмет исследования.** Закономерности влияния параметров и режимов работы измельчителя транспортерно-ножевого типа с вибрирующими ножами на энергозатраты и качество измельчаемого материала.

**Методика исследования.** Теоретические исследования проводились на основе законов и методов классической механики, сопротивления материалов, математического анализа и моделирования. Они включают в себя разработку теоретических положений взаимодействия ножей с упруго-вязким материалом при резании с вибрацией. Экспериментальные исследования проводились в соответствии с общими и частными методиками с использовани-

ем математического планирования и статистики, с обработкой результатов на ПЭВМ.

**Научная новизна:**

- теоретически и экспериментально обоснованные параметры и режимы работы измельчителя корнеплодов с вибрирующими ножами;
- математическая модель измельчения корнеплодов, оценивающая комплексное влияние частоты вибрации ножей и скорости транспортирующей поверхности на энергозатраты при непараллельном расположении ножей;
- конструкция измельчителя корнеплодов транспортерно-ножевого типа с вибрирующими ножами, новизна технического решения которого подтверждена патентом РФ на изобретение № 2324329.

**Практическая значимость работы.** Предложенный измельчитель корнеплодов позволяет по сравнению с серийно-выпускаемым измельчителем ИК-Ф-1 снизить на 38 % удельные энергозатраты на измельчение и на 49,6 % себестоимость готового продукта при требуемом его качестве.

**Реализация результатов исследования.** Измельчитель корнеплодов с вибрирующими ножами внедрен в ООО «Авангард» и ООО «Ульяновская Нива» Ульяновской области.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены на международных научно-практических конференциях Ульяновской ГСХА в 2006 - 2010 г.г., Башкирского ГАУ в 2008 г., Мичуринского ГАУ в 2009 г.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 1 работа - в реферируемом издании, рекомендованном ВАК РФ, а также патент РФ на изобретение. Общий объем публикаций - 1,6 печатных листа, из них автору принадлежит 0,6 печатных листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 183 страницах машинописного текста, в том числе 158 страниц основного текста, и содержит 9 таблиц, 53 иллюстраций, 18 приложений, библиографический список из 137 наименований, из них 3 - на иностранном языке.

**Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:**

- конструктивно-технологическая схема измельчителя корнеплодов с вибрирующими ножами;
- математическая модель процесса виброрезания корнеплодов и полученные аналитические выражения по определению энергозатрат в зависимости от параметров и режимов работы измельчителя;
- результаты лабораторных исследований, оптимальные параметры и режимы работы измельчителя корнеплодов;
- результаты производственных исследований и технико-экономическая оценка измельчителя корнеплодов с вибрирующими ножами.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, изложены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследования»**, рассмотрены зоотехнические требования к измельчению сочных кормов. Проанализированы конструкции измельчителей российских и зарубежных производителей. Выявлены требования, предъявляемые к измельчителям. Большой вклад в исследование процесса резания и создание конструкций измельчителей внесли следующие ученые: Бойко В., Босой Е.С., Бремер Г.И., Василенко И.Ф., Горячкин В.П., Ермичев В.А., Желиговский В.А., Зяблов В.А., Ивашко А.А., Кузьмов Н.Т., Кукта Б.М., Курдюмов В.И., Мейлахс И.И., Мещеряков Б.В., Мишинский В.И., Мянд А.Э., Некрашевич В.Ф., Новиков Г.И., Прокопцев П.И., Резник Н.Е., Сабликов М.В., Уланов И.А., Юхин Г.П. и др.

Анализ исследований показывает, что существующие измельчители корнеплодов имеют ряд недостатков: низкую производительность, высокие энергоемкость и трудоемкость процесса, не соответствие зоотехническим требованиям получаемого корма и др.

На основании анализа состояния вопроса в соответствии с поставленной целью сформулированы следующие **задачи исследований**:

- разработать конструктивно-технологическую схему измельчителя корнеплодов;
- выполнить теоретическое обоснование процесса измельчения корнеплодов в измельчителе с вибрирующими ножами и получить аналитические зависимости для определения его основных параметров;
- получить математическую модель процесса измельчения корнеплодов в измельчителе с вибрирующими ножами и оптимизировать его параметры и режимы работы;
- провести экспериментальные исследования измельчителя и определить экономическую эффективность от его внедрения в производство.

**Во второй главе «Теоретические предпосылки измельчения корнеплодов»** представлена новая конструктивно-технологическая схема измельчителя транспортерно-ножевого типа с вибрирующими ножами (рисунок 1).

Измельчитель корнеплодов включает транспортер 1 с зацепами 11 и приводом 10. Над транспортером 1 на раме 3 закреплен набор непараллельных между собой ножей 9, которые наклонены под углом  $25...41^\circ$  к плоскости транспортера 1. Ножи 9 образуют в горизонтальной плоскости клин с углом  $70...135^\circ$ . Верхняя плита 4 фиксируется в рабочем положении при помощи пружин 6. На плите 4 установлен вибратор 5. На раме 8 закреплены ножи второго блока 7. Для загрузки корнеплодов в измельчитель и последующей выгрузки готового продукта установлены соответственно загрузочный бункер 2 и выгрузной лоток 12.

Для определения взаимосвязи между силами, возникающими в процессе резания, выделим сечение измельчаемого материала (корнеплода) в виде цилиндрического тела и сведем задачу к плоскому случаю (рисунок 2).

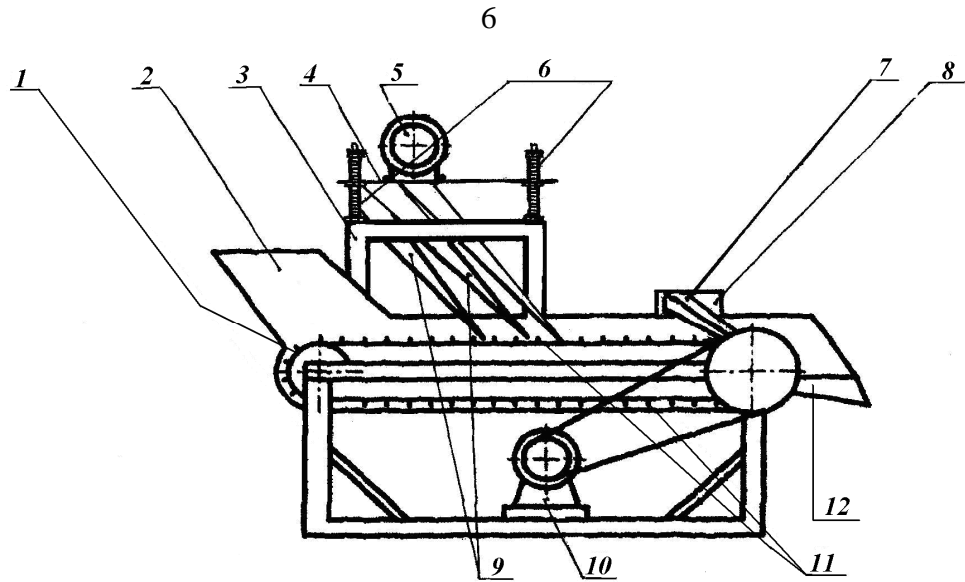
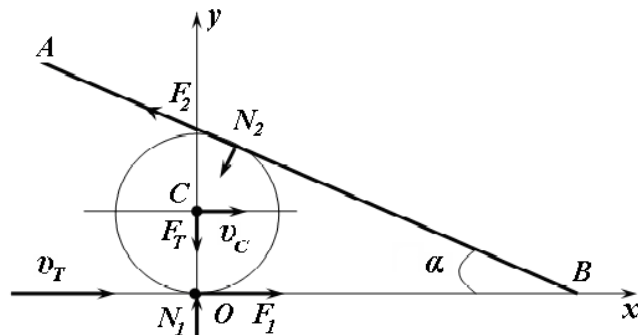


Рисунок 1 – Измельчитель корнеплодов (обозначения в тексте)



$F_m$  – сила тяжести;  $N_1$  – нормальная реакция поверхности транспортера;  $N_2$  – нормальная реакция лезвия ножа;  $F_1$  – сила трения корнеплода о поверхность транспортера;  $F_2$  – сила трения корнеплода о лезвие ножа;  $\alpha$  – угол наклона ножа к транспортирующей поверхности, град.

Рисунок 2 – Схема сил, действующих при измельчении корнеплода

Приложенными к корнеплоду силами будут:  $F_T = mg$  – сила тяжести;  $N_2$  – нормальная реакция лезвия ножа;  $N_1$  – нормальная реакция поверхности транспортера;  $F_2 = f_2 N_2$  – сила трения корнеплода о лезвие ножа;  $F_1 = f_1 N_1$  – сила трения корнеплода о поверхность транспортера.

Опишем движение цилиндрического тела (корнеплода) с помощью системы дифференциальных уравнений.

Рассмотрим равновесие цилиндрического тела, на которое действуют заданные силы. Все силы лежат в одной плоскости и сходятся в точке  $C$ . Проецируя силы взаимодействия на соответствующие координатные оси, получаем решение системы (1):

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = N_2 \cos \alpha - F_2 \sin \alpha + F_T - N_1 \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_1 - F_2 \cos \alpha - N_2 \sin \alpha \\ I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = (f_1 (mg + F_T \cos \alpha) - f_2 F_T \sin(\alpha t)) r \cdot l(t) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $f_1$  – коэффициент трения о поверхность транспортера;  $f_2$  – коэффициент трения о лезвие ножа;  $r$  – радиус корнеплода, м;  $t$  – время полного измельчения корнеплода, с;  $I$  – момент инерции корнеплода, кг·м<sup>2</sup>;  $\varphi$  – угловое ускорение, с<sup>-1</sup>;  $l(t)$  – функция учитывающая изменение длины линии разреза корнеплода в зависимости от времени.

Решая уравнения системы относительно реакции  $N_2$ , приходим к выводу, что для того, чтобы процесс резания имел место, необходимо, чтобы сила трения корнеплода о поверхность транспортера удовлетворяла условию:

$$F_1 > F_2 \cos \alpha - N_2 \sin \alpha.$$

В этом случае нормальная реакция

$$N_2 < f_1 F_T / ((f_2 - f_1) \cos \alpha + (1 + f_1 f_2) \sin \alpha). \quad (2)$$

Следовательно, сила резания также должна удовлетворять соотношению (2), которое в зависимости от угла наклона ножей к плоскости транспортера при различных коэффициентах трения позволяет определить оптимальные параметры процесса резания.

Полученные решения дифференциальных уравнений описывают движение измельчаемого материала при взаимодействии с консольными ножами измельчителя транспортерно-ножевого типа. На рисунке 3 приведены результаты расчетов фазовых траекторий движения корнеплодов.

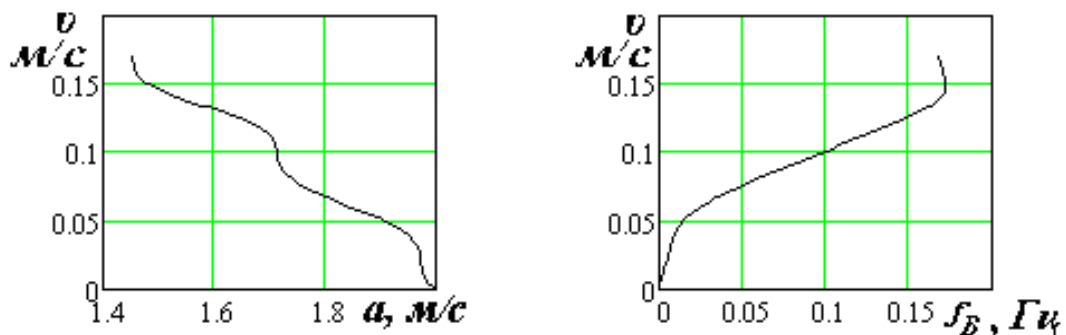


Рисунок 3 – Зависимости линейной скорости корнеплодов  $v$  от ускорения  $a$  корнеплодов (слева) и частоты вибрации  $f_v$  (справа)

Анализируя рисунок 3, приходим к выводу, что линейная скорость движения корнеплода при резании вибрирующим ножом возрастает при увеличении частоты вибрации и уменьшается с увеличением ускорения.

Суммарное сопротивление перемещению кормовой массы через консольные ножи, Н

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{рез}} + P_{\text{сж}} + P_{\text{пер}} + P_{\text{вibr}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{рез}}$  – усилие резания корнеплодов, Н;  $P_{\text{сж}}$  – усилие сжатия и проталкивания материала, Н;  $P_{\text{пер}}$  – усилие перемещения материала транспортером, Н;  $P_{\text{вibr}}$  – усилие, затрачиваемое на вибрационное резание, Н.

Элементарный слой на участке  $S_{\text{сж}}$  претерпевает деформацию, которая описывается уравнением равновесия:

$$F_1 - F_2 + F_3 - F_4 = 0. \quad (4)$$

Силы, действующие на элементарный слой толщиной  $dx$ , высотой  $h$ , шириной  $b$ :

$$F_1 = P_x bl / \sin\chi; \quad (5)$$

$$F_2 = \frac{(P_x - dP_x)}{\sin\chi} \left( b + \operatorname{tg} \left( \frac{\beta}{2} K \right) \frac{dx}{\sin\chi} \right) l; \quad (6)$$

$$F_3 = \frac{P_x}{\varepsilon_2 \cdot \sin\chi} l \cdot \cos^2 \left( \frac{\beta}{2} K \right) \frac{dx}{\sin\chi}; \quad (7)$$

$$F_4 = \frac{P_x f_2}{\varepsilon_2 \sin\chi} l \frac{dx}{\sin\chi} + \frac{P_x f_2}{\varepsilon_2 \sin\chi} \frac{h}{\sin\chi} \cos^2 \left( \frac{\beta}{2} K \right) \frac{dx}{\sin\chi}, \quad (8)$$

где  $P_x$  – давление на элементарный слой, создаваемое ножом, Н/м<sup>2</sup>;  $l = h/\sin\chi$ ;  $\varepsilon_2$  – коэффициент бокового расширения;  $\chi$  – угол защемления, град.;  $\beta$  – угол заточки лезвия, град.

Решая уравнение (4) с учетом выражений (5 – 8) относительно переменных  $P$  и  $x$ , получаем формулу для определения усилия в произвольном сечении на расстоянии  $x$  от лезвия (в случае параллельного расположения ножей):

$$P_{\text{сж}} = P_0 \exp(zx), \quad (9)$$

где  $z = \{f_2 [1 + \cos^2(0,5\beta K_n)] + [\varepsilon_2 \cdot \operatorname{tg}(0,5\beta K_n) - \cos(0,5\beta K_n)]\} / (\varepsilon_2 b \cdot \sin\chi)$ .

В случае непараллельного расположения ножей, когда  $\chi_1 \neq \chi_2$ , как показано на рисунке 4, учитывая, что  $l = AB$ ,  $y = OB$ :

$$\bar{P}_2 = P_0 \int_0^l \exp[zx(y)] dy / l. \quad (10)$$

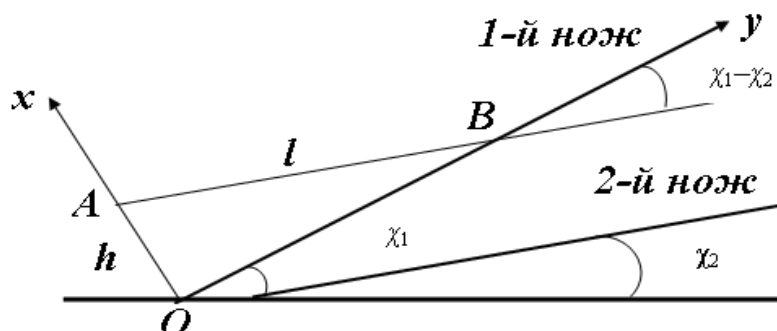


Рисунок 4 - К определению параметров измельчающего аппарата при непараллельном расположении ножей относительно поверхности транспортера

Решив выражение 10, получаем:

$$\bar{P}_2 = P_0 \frac{\exp(zl \cdot \operatorname{tg}(\chi_1 - \chi_2))(1 - \exp(-zl \cdot \operatorname{tg}(\chi_1 - \chi_2)))}{l \cdot z \cdot \operatorname{tg}(\chi_1 - \chi_2)}. \quad (11)$$

Но так как  $h = l \cdot \operatorname{tg}(\chi_1 - \chi_2)$ , то  $\bar{P}_2 = \bar{P}_1 \frac{(1 - \exp(-zl \cdot \operatorname{tg}(\chi_1 - \chi_2)))}{l \cdot z \cdot \operatorname{tg}(\chi_1 - \chi_2)}$ . (12)

И поскольку  $\frac{(1 - \exp(-zl \cdot \operatorname{tg}(\chi_1 - \chi_2)))}{lz \cdot \operatorname{tg}(\chi_1 - \chi_2)} < 1$ , то  $\bar{P}_2 < \bar{P}_1$ . (13)

Учитывая влияние массы корнеплода  $m$ , кг, нормальной реакции лезвия ножа на измельчаемый материал и угол трения корнеплода о поверхность  $\varphi_{mp}$  на угол защемления, для дальнейших расчетов применяем формулу:

$$\chi = 2\varphi_{mp} + \arcsin \left[ \frac{mg}{2N_2} \sin(2\varphi_{mp}) \right]. \quad (14)$$



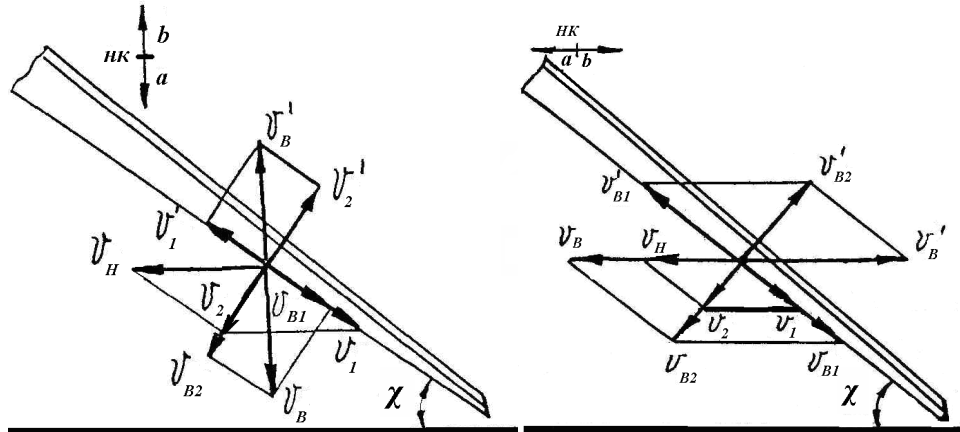
Это означает, что усилие сжатия и проталкивания корнеплодов уменьшается при непараллельном расположении консольных ножей. Следовательно, происходит снижение энергоемкости процесса измельчения.

Так как в процессе измельчения в предлагаемом измельчителе присутствует вибрация, то необходимо выбрать ее направление.

При наложении на ножи продольной вибрации ее направление параллельно направлению прямолинейного движения корнеплодов в измельчающем аппарате (рисунок 5). Тогда абсолютная скорость ножей:

$$v_{авс} = v_{mp} + Af_v \cos \alpha, \quad (15)$$

где  $v_{mp}$  – скорость перемещения корнеплодов транспортером, м/с.



а) поперечная вибрация

б) продольная вибрация

Рисунок 5 - Модель взаимодействия ножа с измельчаемым материалом

Из выражения (15) следует, что при  $v_{mp} > Af_v$  движение ножей пульсирующее, при  $v_{mp} < Af_v$  ножи скользят относительно корнеплодов вперед и назад. Во втором случае при  $v_{авс} < 0$  сила трения  $F_{mp}$  способствует перемещению ножей, т.е. происходит так называемое отрицательное трение.

Таким образом, при продольных колебаниях степень снижения силы трения зависит от числа Струхала, что не противоречит экспериментальным данным, полученным И.Я. Федоренко, В.И. Баловневым, А.А. Дубровским. В отличие от поперечных колебаний ножа эффект по кажущемуся снижению силы трения можно получить лишь при  $Sh < 1$ , т.е. при  $v_{mp} < Af_v$ .

Вибрации, направление которых составляет угол  $0 < \varphi < 0,5\pi$  с направлением поверхности транспортера, будут промежуточными по всем показателям между продольными и поперечными.

Проанализировав выше изложенное и учитывая результаты исследований процесса виброизмельчения, можно сделать вывод: снижение усилия резания наблюдается при увеличении скорости резания и выборе направления вибраций параллельно транспортеру.

$$v_{рез} = \sqrt{v_n^2 \cos^2(90 - \chi) + v_2^2 \sin^2(90 - \chi) + v_v^2}, \quad (16)$$

где  $v_n$  – скорость ножа, м/с;  $v_2$  – нормальная составляющая скорости ножа, м/с;  $v_v$  – виброскорость ножа, м/с.

$$\text{При этом скорость резания } v_{рез} = 2v_{mp} \operatorname{tg}(0,5\chi) \pm 2\pi f_v A. \quad (17)$$

Следовательно, скорость резания корнеплодов в предложенном измель-

чителе транспортерно-ножевого типа с вибрирующими ножами зависит от скорости  $v_{mp}$ , угла защемления корнеплодов  $\chi$ , амплитуды  $A$  и частоты колебания  $f_b$  ножей.

В процессе резания по мере продвижения корнеплода вдоль оси  $Ox$ , которая направлена по ходу движения транспортерной ленты, происходит изменение границы резания, т.е. корнеплод разрезается по радиусу, а линией разреза является хорда. Причем хорда сначала увеличивается от 0 до  $2r$  (где  $r$  – радиус корнеплода), а после достижения значения координаты  $x = 2r$  начинается процесс уменьшения хорды до 0. Таким образом, движение цилиндрического тела по поверхности транспортера при резании от начала до конца процесса измельчения описывается следующей зависимостью:

$$R(x) = \begin{cases} (r - x \cdot \sin \chi) & \text{при } x \leq x_0 = 2r; \\ (x \cdot \sin \chi - r) & \text{при } x > x_0 = 2r. \end{cases} \quad (18)$$

Используя выражение (18), выясним влияние угла защемления  $\chi$  (угла наклона ножей) на расстояние  $r(x)$  от линии среза цилиндрического тела до центра модели. При этом получим зависимость длины линии среза от перемещения корнеплода вдоль ножа и угла наклона ножа:

$$l(x) = 2\sqrt{2rx \cdot \sin \chi - x^2(\sin \chi)^2}. \quad (19)$$

Этот процесс геометрически представлен на рисунке 6.

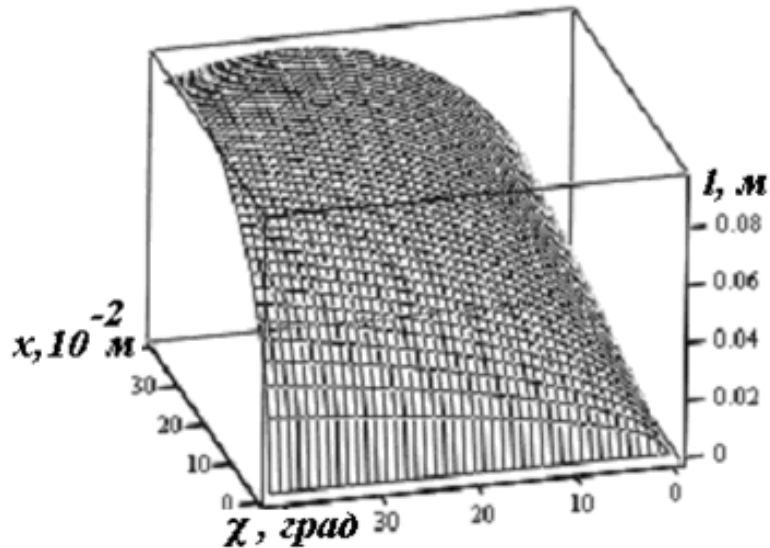


Рисунок 6 – Зависимость длины линии среза от угла защемления  $\chi$  и перемещения корнеплода  $x$  вдоль ножа

С учетом изложенного ножи предлагаемого измельчителя транспортерно-ножевого типа установим в плане под острым углом. При таком расположении ножей уменьшается путь заблокированного резания, что позволяет снизить энергоемкость процесса.

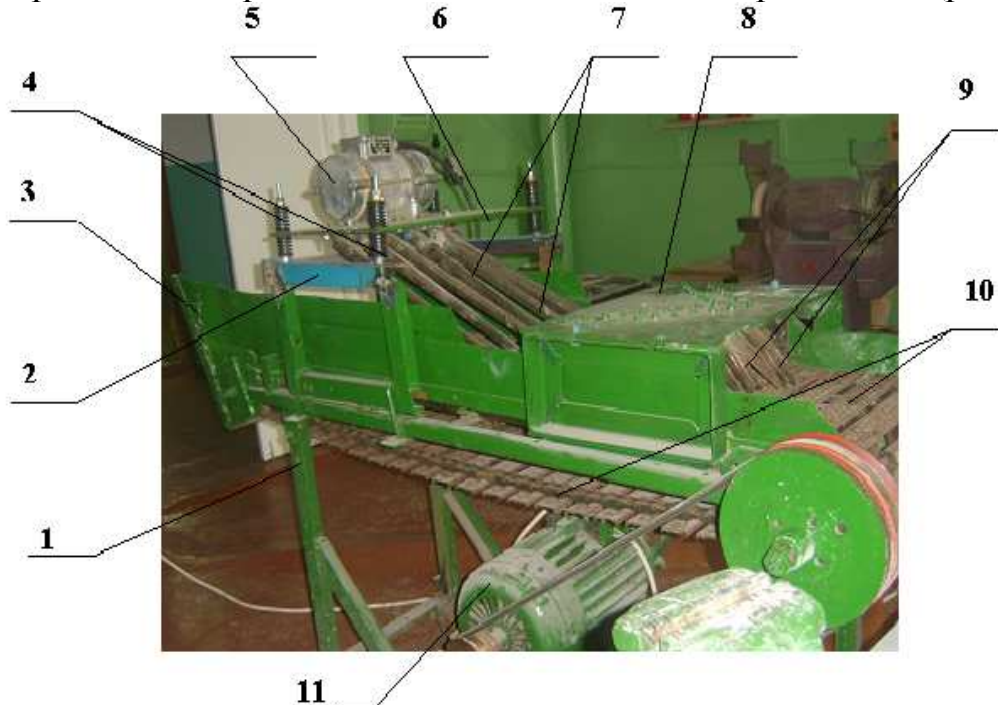
Решая задачу о снижении энергоемкости процесса измельчения, необходимо определить, какая мощность затрачивается на данный процесс. Общая мощность  $W_0$ , требуемая на измельчение корнеплодов, состоит из мощности резания  $W_p$ , мощности холостого хода  $W_{xx}$ , мощности, требуемой на вибрацию ножей  $W_b$ , а также мощности на транспортирование материала  $W_{mp}$ :

$$W_o = W_p + W_{xx} + W_B + W_{mp} = \frac{v_{mp} \left( F_{mp.с} \cos \frac{\beta}{2} + P_{рез.с} \sin \frac{\beta}{2} \right)}{360\eta} + \frac{v_{mp} g t_H m_{noz}}{360\eta} + \frac{2(m_{пл} + m_n)(\pi f_B A)^2}{t} + \frac{v_{mp} K_P ((m_1 + m_2)g + N_1)}{360\eta}, \quad (20)$$

где  $F_{mp.с}$  – сила трения при виброрезании, Н;  $P_{рез.с}$  – сила резания с вибрацией, Н;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $t_H$  – расстояние между роlikоопорами транспортера, м;  $m_{noz}$  – масса одного метра поверхности транспортера, кг/м;  $m_{пл}$  – масса плиты и вибратора, кг;  $m_n$  – масса вибрирующих ножей, кг;  $f_B$  – частота вибрации, Гц;  $A$  – амплитуда колебания ножей, м;  $K_P$  – коэффициент сопротивления перекатыванию;  $m_1$  – масса перемещаемого транспортером измельчаемого материала, кг;  $m_2$  – масса поверхности транспортирования, кг;  $\eta$  – КПД клиноременной передачи, подшипников, звездочек;  $t$  – время измельчения, с.

Таким образом, мощность, требуемая на измельчение корнеплодов, зависит от конструктивных параметров и режимов работы измельчителя, а также от свойств измельчаемого материала.

**В третьем разделе** «Лабораторные исследования процесса измельчения корнеплодов с использованием вибрации» изложены программа и методика исследований, описание лабораторной установки, приборов для контроля и измерения параметров рабочего процесса измельчения корнеплодов, представлены результаты лабораторных исследований, определены оптимальные режимы работы экспериментального измельчителя корнеплодов (рисунок 7).



1 – рама; 2 – рама первого блока ножей; 3 – приемный бункер; 4 – успокаивающие пружины; 5 – вибратор; 6 – плита; 7 – консольные ножи первого блока; 8 – плита второго блока ножей; 9 – ножи второго блока; 10 – цепочно-планчатый транспортер; 11 – электродвигатель

Рисунок 7 – Общий вид экспериментального измельчителя

Данные, полученные при проведении лабораторных исследований, обрабатывали на ПЭВМ с помощью программ «Excel», «MathCad-14» и «Statistika-6».

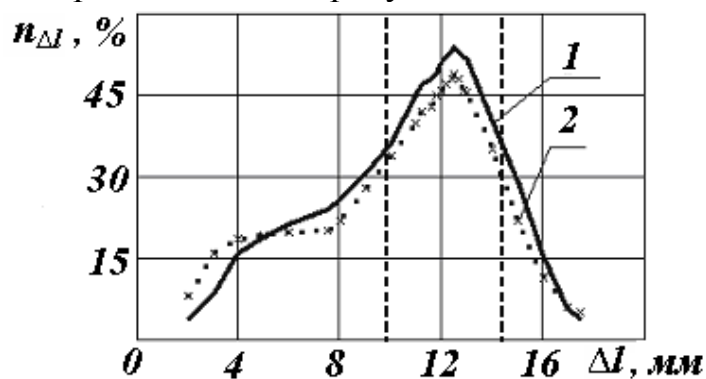
Для определения амплитуды и частоты колебаний измельчающего аппарата использовали виброграф ручной ВР-1А. Наличие самописца обеспечило регистрацию и определение характеристик сообщаемой вибрации.

В соответствии с целью и задачами экспериментальных исследований определяли пропускную способность, качество готового корма, энергетические характеристики.

Оценка качества измельчения также является задачей, предусмотренной программой экспериментальных исследований. Для ее решения определяли фракционный состав измельченного корма, средневзвешенный размер частиц, степень измельчения и коэффициент однородности измельченной массы.

По результатам исследовательских опытов степень измельчения корнеплодов измельчителем транспортерно-ножевого типа с вибрирующими ножами  $\lambda_{ив} = 4,48$ , а без применения вибрации  $\lambda_{и} = 4,15$ .

Вариационные кривые распределения толщины частиц измельченного корма по фракциям представлены на рисунке 8.



1 – с наложением вибрации, 2 – без вибрации

$n_{\Delta l}$  – частота, %;  $\Delta l$  – размер измельченных частиц, мм

Рисунок 8 – Распределение измельченных частиц по фракциям при измельчении

При этом в первом случае зоотехническим требованиям соответствовало 54 % частиц, а во втором – 49 % частиц.

За критерий оптимизации были приняты удельные затраты электроэнергии, отнесенные к единице степени измельчения, кВт·ч/т:

$$K_{э \rightarrow \min} = W_{изм} / [QK_{одн}(\lambda - 1)], \quad (21)$$

где  $W_{изм}$  – мощность, требуемая на измельчение материала, кВт;  $Q$  – пропускная способность, т/ч;  $K_{одн}$  – критерий однородности;  $\lambda$  – степень измельчения;  $K_{одн} = m_{\phi} / m_o$ , где  $m_{\phi}$  – масса фракции измельченного корма, соответствующего зоотехническим требованиям, кг;  $m_o$  – общая масса корма, кг.

Такой критерий оптимизации позволяет сравнивать различные режимы работы измельчителя корнеплодов при любой степени измельчения и, учитывая его работу, характеризует энергозатраты на получение измельченного корма.

Показатель однородности  $K_{\text{одн}}$  при измельчении с помощью вибрирующих ножей равен 0,54, без вибрации  $K_{\text{одн}} = 0,49$ .

После исследования факторов, влияющих на выходные параметры процесса измельчения, из них выделили лишь три управляемых и контролируемых: скорость поверхности транспортера  $v_{\text{мп}}$ , угол заземления  $\chi$  и частоту вибрации  $f_{\text{в}}$ .

Скорость  $v_{\text{мп}}$  изменяли в пределах 2,9...8 м/с; угол  $\chi$  варьировали с шагом  $4^\circ$  в пределах 25...41°; частоту вибраций меняли в пределах 20...47 Гц. Скорость поверхности транспортера  $v_{\text{мп}}$  регулировали, изменяя реостатом сопротивление фазного ротора электродвигателя привода измельчителя.

Экспериментально доказано, что оптимальная частота вибрации ножей должна составлять 32...36 Гц.

Характер изменения энергозатрат  $W$  от скорости движения поверхности транспортера  $v_{\text{мп}}$ , м/с, при различной частоте вибрации  $f_{\text{в}}$ , с<sup>-1</sup>, ножей достоверно описывается уравнением регрессии в натуральных значениях независимых факторов процесса измельчения корнеплодов с вибрацией ножей:

$$W = 0,671 - 3,444 \cdot 10^{-3} v_{\text{мп}} + 3,921 \cdot 10^{-4} v_{\text{мп}}^2 - 2,661 \cdot 10^{-4} f_{\text{в}} + 4,253 \cdot 10^{-5} f_{\text{в}}^2 - 1,538 \cdot 10^{-5} f_{\text{в}} v_{\text{мп}}. \quad (22)$$

Графическое изображение поверхности отклика, соответствующей уравнению (22), представлено на рисунке 9. Экстремум функции  $W(v_{\text{мп}}, f_{\text{в}})$  находится в точке  $S$  (5,02 м/с; 32,19 Гц), в которой достигается минимальное значение затрат энергии  $W = 0,619$  кВт.

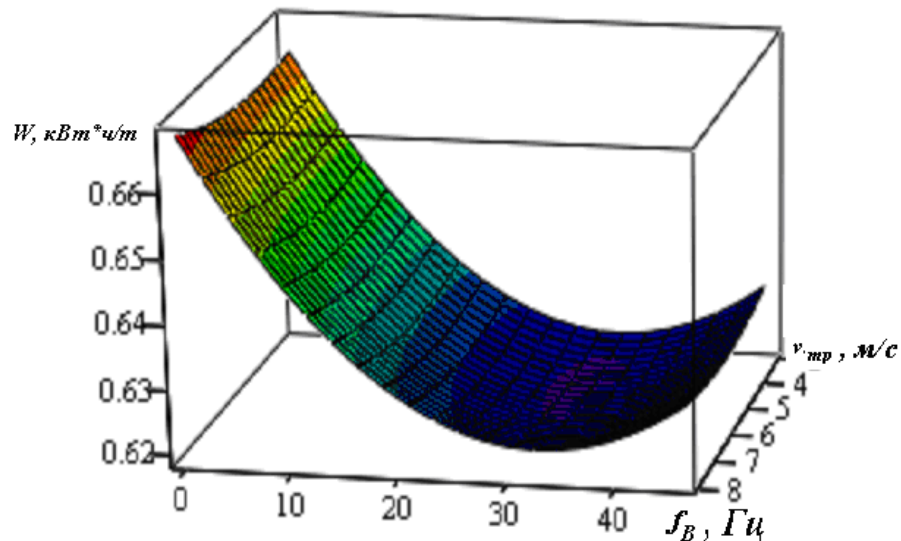


Рисунок 9 - Экспериментальная зависимость энергозатрат  $W$  от скорости поверхности транспортера  $v_{\text{мп}}$  при различной частоте вибрации ножей  $f_{\text{в}}$  измельчителя корнеплодов

Для сравнительного анализа построены кривые (рисунок 10), которые описывают изменение удельных энергозатрат  $W$  от скорости  $v_{\text{мп}}$  с применением вибрации и без нее.

Уравнение регрессии, которое описывает процесс измельчения корнеплодов без применения вибрации, представлено ниже:



$$W = 3,704 \cdot 10^{-4} v_{mp}^2 - 3,296 \cdot 10^{-3} v_{mp} + 0,671. \quad (23)$$

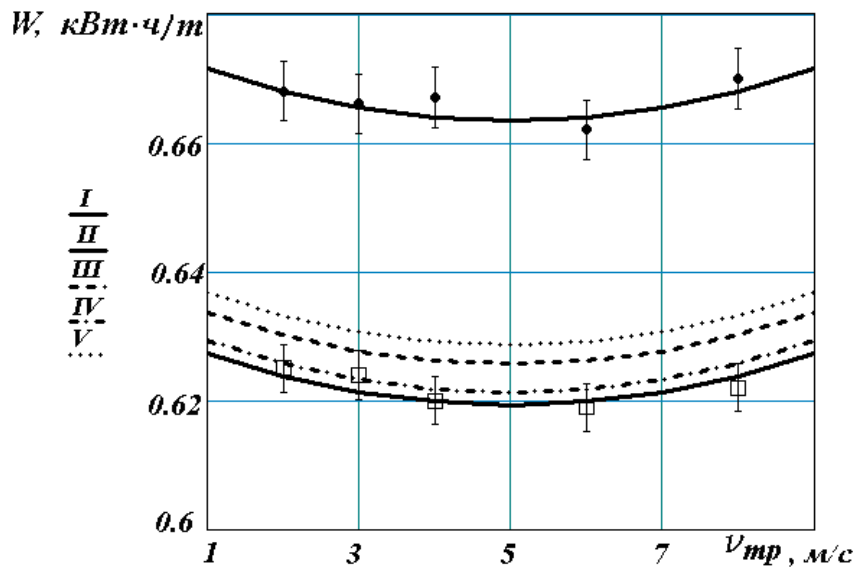
При таком измельчении минимальные удельные затраты энергии равны 0,664 кВт·ч/т при скорости транспортирующей поверхности 5,02 м/с.

Проанализировав зависимости (22, 23) можно сделать вывод, что при применении вибрации в процессе измельчения корнеплодов энергозатраты можно снизить на 7 %.

В кодированных значениях факторов уравнение регрессии (22) принимает следующий вид:

$$Y = 0,6256 + 0,0003x_1 + 0,0042x_2 + 0,0022x_1^2 - 0,0152x_1x_2 + 0,0105x_2^2, \quad (24)$$

где  $Y$  – удельные затраты энергии на измельчение, кВт·ч/т;  $x_1$  – скорость транспортирующей поверхности;  $x_2$  – частота вибрации.



I - без вибрации; II -  $f_B = 32,2$  Гц; III -  $f_B = 20$  Гц; IV -  $f_B = 38$  Гц; V -  $f_B = 47$  Гц

Рисунок 10 – Зависимость удельной энергоёмкости измельчения корнеплодов от скорости резания

Уравнение (24) использовали для построения изолиний поверхности отклика. Графическое представление, соответствующее семейству кривых, показано на рисунке 11.

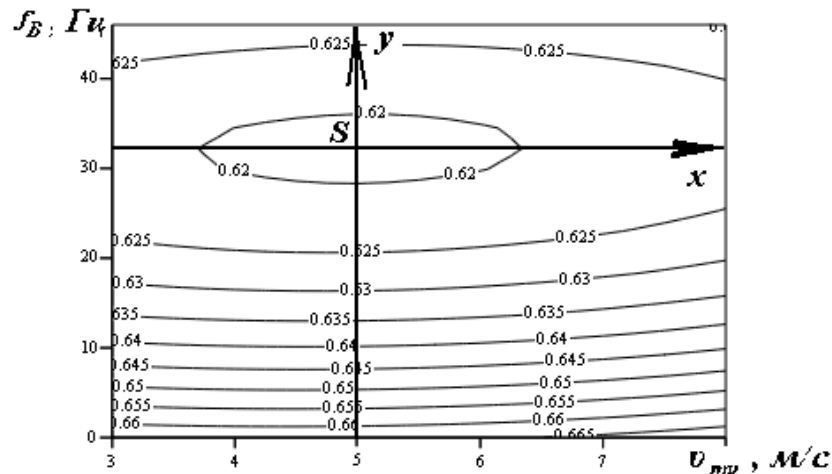


Рисунок 11 - Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость удельных энергозатрат от  $v_{mp}$  и  $f_6$

При рассмотрении полученного сечения поверхности можно отметить, что удельные затраты энергии минимальны в точке  $S$  при частоте вибрации  $f_b = 32,19$  Гц, скорости движения поверхности транспортера  $v_{mp} = 5,02$  м/с и равны  $0,619$  кВт·ч/т. Причем параметр оптимизации при изменении частоты вибрации ножей меняется интенсивнее, чем при изменении скорости поверхности транспортера.

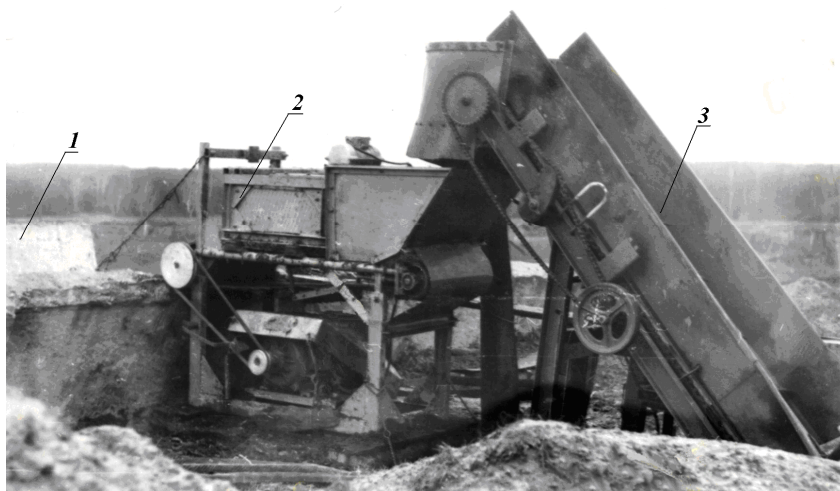
Проверка уравнения (24) по критерию Фишера подтвердила его адекватность, а по критерию Кохрена - воспроизводимость результатов измерений.

**В четвертом разделе** «Производственные исследования и экономическая эффективность работы измельчителя корнеплодов» изложена программа, методика и результаты производственных исследований предлагаемого измельчителя корнеплодов, которые были проведены в ООО «Авангард» и ООО «Ульяновская Нива» Ульяновской области.

Предлагаемый измельчитель, который применялся в производственных исследованиях, представлен на рисунке 12.

При исследованиях измельчаемым материалом являлась кормовая свекла сорта «Эккендорфская желтая».

В соответствии с целями и задачами производственных исследований измеряли мощность привода машины, ее пропускную способность, энергоёмкость и качество получаемого после измельчения корма.



*1 – транспортер; 2 – экспериментальный измельчитель;  
3 – подающий транспортер*

*Рисунок 12 – Измельчитель корнеплодов с вибрирующими ножами при проведении производственных исследований*

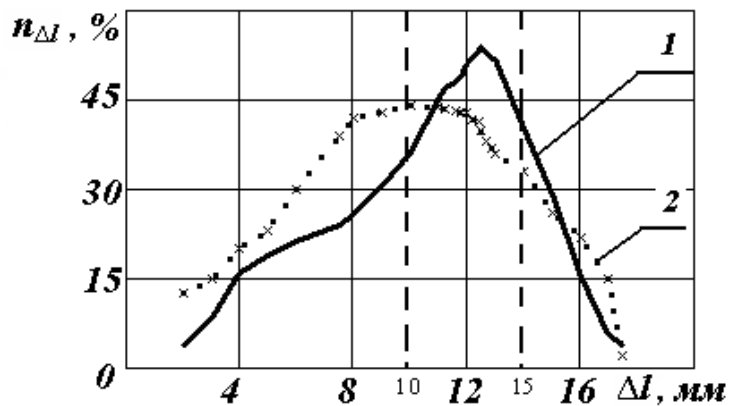
Проведенные исследования показали, что технологический принцип, заложенный в конструкцию измельчителя, полностью оправдался. Общая конструктивная схема машины решена удачно и обеспечивает нормальную ее работу на корнеплодах любой крупности. Результаты производственных исследований представлены в актах внедрения.

При производственных исследованиях удельная энергоёмкость измельчения изменялась в пределах  $0,63...0,65$  кВт·ч/т, а пропускная способность - в пределах  $9,5...10,6$  т/ч.

Анализ качества измельченного корма проводили путем его сравнения с фракционным составом корма, полученного после измельчения серийно выпускаемым измельчителем ИК-Ф-1 (рисунок 13).

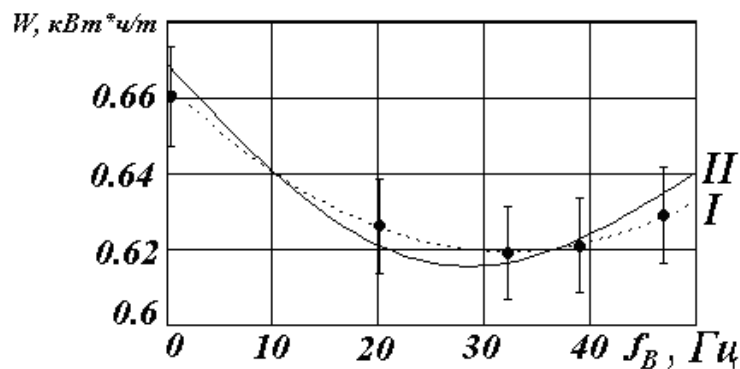
Результаты производственных исследований подтвердили основные теоретические положения и результаты лабораторных исследований. Погрешность не превышает 10 % (рисунок 14).

Пропускная способность предлагаемого измельчителя выше в 3 раза, чем у ИК-Ф-1, а удельная энергоемкость измельчения корнеплодов меньше на 0,38 кВт·ч/т при лучшем качестве готового продукта. Кроме того, предлагаемый измельчитель имеет на 30,6 % меньшую удельную металлоемкость по сравнению с серийным измельчителем ИК-Ф-1.



*1 – экспериментальный измельчитель, 2 – серийный измельчитель ИК-Ф-1*

*Рисунок 13 – Распределение фракционного состава измельченного корма*



*Рисунок 14 – Сходимость результатов теоретических – II и экспериментальных исследований – I*

Результаты сравнения показывают, что основные показатели предлагаемого измельчителя лучше, чем аналогичные показатели серийного измельчителя корнеплодов ИК-Ф-1. При удельной энергоемкости измельчения 0,62 кВт·ч/т затраты на электроэнергию снижаются на 38 % (1675,8 рубля) за год эксплуатации. Себестоимость измельчения корнеплодов предлагаемым измельчителем на 49,6 % ниже, по сравнению с серийно выпускаемым измельчителем ИК-Ф-1. При пропускной способности 10,65 т/ч предлагаемого измельчителя транспортерно-ножевого типа с вибрирующими ножами годовой экономический эффект составил 16399 рублей, а срок окупаемости измельчителя не превысил 1,46 года.



Качество корма, оцененное с помощью полученного после измельчения его предлагаемым измельчителем с вибрирующими ножами на 9 % лучше по сравнению с качеством корма, полученного после измельчения серийным ИК-Ф-1.

Меньшая стоимость предлагаемого измельчителя, улучшенные технико-экономические показатели, возможности приготовления измельченного корма, соответствующего зоотехническим требованиям, свидетельствует о том, что разработанный измельчитель может быть эффективно использован сельскохозяйственными предприятиями.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе выполненного анализа существующих конструкций измельчителей корнеплодов и выполненных исследований разработана новая конструкция измельчителя корнеплодов с вибрирующими ножами.

Он включает в себя транспортер с зацепами и приводом, а также установленные над транспортером два блока непараллельных между собой ножей, закрепленных на каркасе с наклоном  $25...41^\circ$  к плоскости транспортера и образующих в горизонтальной плоскости клин с углом  $70...135^\circ$ . Каркас снабжен верхней плитой, на которой установлены ножи первого блока. Верхняя плита установлена с возможностью перемещения вдоль осевой линии транспортера и снабжена вибратором.

2. Установлены теоретические зависимости энергоемкости процесса измельчения корнеплодов с использованием вибрации, усилия резания и пропускной способности от конструктивно-режимных параметров измельчителя корнеплодов. Обоснованы основные параметры измельчающего аппарата: углы наклона ножей и расположения их в плане.

3. Получена адекватная математическая модель процесса измельчения корнеплодов в измельчителе ножевого типа с вибрирующими ножами. Анализ полученной модели позволил определить оптимальные параметры и режимы работы измельчителя.

Лучшее качество измельчения корнеплодов с минимальными затратами энергии обеспечивается при скорости поверхности транспортера  $v_{mp} = 5$  м/с и частоте продольных вибрации ножей  $f_e = 32,2$  Гц. В этом случае удельная энергоемкость процесса составляет 0,619 кВт·ч/т.

4. Полученные в ходе производственных исследований результаты подтверждают результаты теоретических и лабораторных исследований и свидетельствуют об эффективности предложенного измельчителя корнеплодов. Пропускная способность измельчителя составляет 10,65 т/ч, а удельная энергоемкость измельчения на 38 % ниже, чем у серийно выпускающегося измельчителя ИК-Ф-1. Коэффициент однородности измельченного продукта  $K_o$ , характеризующий качество измельчения, соответственно выше на 9 %. Удельные затраты энергии, приходящиеся на единицу массы продукта, измельченного с требуемым качеством экспериментальным измельчителем ниже, чем у ИК-Ф-1 в 2,6 раза.

Себестоимость измельчения корнеплодов предлагаемым измельчителем на 49,6 % ниже, по сравнению с серийно выпускаемым измельчителем ИК-Ф-1. Это позволяет получить годовой экономический эффект в размере 16399 рублей при сроке окупаемости нового измельчителя 1,46 года.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

### *Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК*

1. Хабарова, В.В. Процесс измельчения корнеплодов консольными ножами / Ю.М. Исаев, В.В. Хабарова, В.А. Богатов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. - № 1. - С. 14 – 16.

### *Патенты*

2. Патент РФ № 2324329. Измельчитель корнеплодов// Курдюмов В.И., Зотов Е.И., Хабарова В.В. Заявка № 2005137434; заявл. 01.12.2005; опубл. 20.05.2008, Бюл. № 14.

### *Публикации в сборниках научных трудов и материалах конференций*

3. Хабарова, В.В. Анализ факторов, определяющих энергозатраты с вибрациями при измельчении корнеплодов и бахчевых/ В.В. Хабарова, В.А. Богатов, Е.И. Зотов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - № 1 (2) январь - март 2006 г. - С. 67-70.

4. Хабарова, В.В. Расположение ножей при измельчении корнеплодов / В.В. Хабарова, Ю.М. Исаев, В.А. Богатов // Современные наукоемкие технологии. - № 2. – 2008. - С. 136-137.

5. Хабарова, В.В. Условия измельчения корнеплодов консольными ножами / Ю.М. Исаев, В.В. Хабарова // Инновационные технологии в растениеводстве: Материалы науч.-практ. конф. 27 марта 2009 г. / Под ред. Н.Н. Бабича, Г.Н. Пугачева. – Мичуринск: Изд – во Мичуринского госагроуниверситета, 2009. - С. 199-202.

6. Хабарова, В.В. Оптимальные усилия резания корнеплодов / Ю.М. Исаев, Е.И. Зотов, В.В. Хабарова, Е.В. Гришина // Успехи современного естествознания. - № 5. – 2009. С. 23.

7. Хабарова, В.В. Особенности измельчения корнеплодов консольными ножами / В.В. Хабарова, Р.М. Гайсин, Ю.М. Исаев, В.А. Богатов // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Интеграция аграрной науки и производства: состояние, проблемы и пути их решения». - Уфа: ФГОУ ВПО «Башкирский ГАУ», 2008. - С. 84–86.

8. Хабарова, В.В. Модель движения корнеплодов в процессе резания консольными ножами / В.В. Хабарова, Ю.М. Исаев, В.А. Богатов // «Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения» // Материалы II-ой Международной научно-практической конференции. - Ульяновск: Ульяновская ГСХА, 2010 г. - С. 129-132.

9. Хабарова, В.В. Резание движущегося корнеплода вибрирующими ножами / В.В. Хабарова, Ю.М. Исаев, Т.А. Джабраилов // «Молодежь и наука XXI века» // Материалы III-ой Международной научно-практической конференции. - Ульяновск: Ульяновская ГСХА, 2010 г., т. 4. - С. 135-137.

---

Подписано в печать 17.01.11 г.

Формат 60x84  $\frac{1}{16}$

Бумага типогр.

Гарнитура Times New Roman

Усл. печ. л. 1,0

Тираж – 100 экз.

Заказ - 787

432980 г. Ульяновск, б. Новый Венец, 1