

На правах рукописи



Плахов Сергей Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ОСНОВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ВИБРОРОТАЦИОННОЙ СОРТИРОВКИ КАРТОФЕЛЯ**

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Калуга – 2014

Работа выполнена в Калужском филиале федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (ФГБОУ ВПО «КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана»)

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Алакин Виктор Михайлович

Официальные оппоненты: **Пшеченков Константин Александрович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт картофельного хозяйства им. Г.А. Лорха», заведующий лабораторией оценки сортов на пригодность к переработке и хранению

Степанов Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», доцент кафедры «Профессиональной аттестации и внедрения инноваций»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Калужский научно-исследовательский институт сельского хозяйства»

Защита состоится 11 декабря 2014 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.010.04, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВПО «ВГАУ») по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ВГАУ» и на сайте **www.vsau.ru** («Информация о деятельности диссертационных советов» – «Защиты» – «Д 220.010.04»), а также по ссылке: **http://ds.vsau.ru/?p=951**.

Автореферат разослан 30 октября 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 220.010.04



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Картофель относится к важнейшим сельскохозяйственным культурам, производимым в России и во всем мире. Вступление России в ВТО предполагает жесткие конкурентные условия. Доктрина продовольственной безопасности России требует решения вопроса по обеспечению населения продуктами питания собственного производства не менее 95 %.

В стране увеличивается доля картофеля, производимого фермерскими и сельскохозяйственными организациями на основе современных машинных технологий. В тоже время товарное качество производимой продукции зачастую невысокое, а общие потери на пути поле – потребитель в ряде случаев достигают 30 % и более. В значительной мере это обусловлено применяемыми технологиями и оборудованием для послеуборочной доработки картофеля и качеством посадочного материала.

Наиболее трудоемкими и сложными операциями доработки вороха картофеля, являются сепарация примесей и разделение клубней на фракции, в том числе по причине значительного содержания в ворохе переувлажненной почвы и различных примесей. Применяемое в хозяйствах оборудование не в полной мере обеспечивает необходимые качественные, эксплуатационные и экономические показатели. Поэтому решение вопросов разработки оборудования для послеуборочной доработки картофеля с целью повышения эффективности и качества обработки клубней при снижении материало-энергоёмкости, указывает на актуальность темы работы

Степень разработанности темы. Аналитический обзор материалов по тематике исследований произведен на основе работ известных ученых: Н.В. Бышова, Н.И. Верещагина, В.П. Горячкина, Е.А. Глухих, Н.Н. Колчина, М.Е. Мацепуро, Г.Д. Петрова, К.А. Пшеченкова, И.М. Полуночева, А.А. Сорокина, В.М. Чауса, Н.В. Шабурова, Б.М. Юна, К. Vaganz и других.

Изучение и анализ разработанных технико-технологических и конструктивных решений, направленных на повышение эффективности послеуборочной доработки картофеля, показывает, что существует необходимость и возможность дальнейшей разработки и совершенствования процессов и технических средств для послеуборочной доработки картофеля.

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ на кафедре «Автомобиле- и тракторостроение» Калужского филиала ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана».

Цель работы заключается в повышении технологической эффективности сортирующих устройств, путем оптимизации параметров и режимов работы виброротационной рабочей поверхности, обеспечивающей повышение производительности и точности сортирования картофеля.

Объекты исследований. Оборудование и технологические процессы сортирования картофеля и сепарации примесей, ворох картофеля, экспериментальный образец универсального виброротационного сортирующего устройства.

Предмет исследований. Теоретические и экспериментальные закономерности процесса сортирования клубней на картофелесортирующих устройствах.

Научная проблема состоит в необходимости повышения производительности и точности сортирования картофелесортирующих устройств, в том числе путем совершенствования рабочих органов и совмещения их вращательного и вибрационного действия на обрабатываемый продукт.

Научную новизну составляют:

- на основании научных исследований разработан экспериментальный образец нового виброротационного сортирующего устройства для сепарации примесей и сортирования клубней (патент РФ на изобретение № 2489067 опубликовано 10.08.2013 Бюл. № 22 «Установка для послеуборочной обработки плодовоовощной продукции (варианты)»);

- аналитические зависимости для определения рациональных конструктивных, кинематических и вибрационных параметров сортирующего устройства, отличающиеся использованием совместного вибрационного и кинематического действия в процессе сортирования клубней;

- методика и зависимости для определения контактных усилий взаимодействия и упругих характеристик вибророторов, отличающиеся учетом формы новых рабочих органов и виброкинематическим взаимодействием с клубнями;

- математическая модель процесса сортирования картофеля, отличающаяся установлением взаимосвязи основных параметров технологического процесса с точностью сортирования.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- методика определения параметров вращательного и вибрационного действия рабочих органов сортирующей поверхности;

- методика определения контактного взаимодействия, уровня механических повреждения клубней и изменения геометрии калибрующего отверстия при вибрации рабочих органов;

- изготовлен и испытан экспериментальный образец оригинального виброротационного сортирующего устройства, (патент РФ на изобретение № 2489067), обоснованы конструктивные параметры и режимы работы, обеспечивающие повышение производительности, точности сортирования клубней и универсальности применения;

- предложено конструктивное и технологическое решение способа совмещения вращательного и вибрационного движения рабочих органов, которое может быть использовано при разработке перспективного оборудования для послеуборочной доработки картофеля.

Методы исследования. Теоретическая часть исследований выполнена с использованием закономерностей и методов теоретической механики, сопротивления материалов и математического анализа. Обоснование конструктивных, кинематических и вибрационных параметров виброротационных рабочих органов произведено на основании известных и разработанных методик. Экспериментальные исследования виброротационного сортирующего устройства проведены на основании теории планирования многофакторного эксперимента. Результаты обрабатывались с помощью методов математической статистики и пакета прикладных программ.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- конструктивно-технологическая схема и экспериментальный образец нового виброротационного сортирующего устройства;
- аналитические зависимости и рациональные параметры виброкинематического процесса сортирования;
- математическая модель процесса виброкинематического сортирования, связывающая основные параметры сортирующего устройства с точностью сортирования;
- технологические и конструктивные параметры виброротационного сортирующего устройства, обеспечивающие повышение эффективности и универсальности послеуборочной доработки картофеля.

Достоверность основных положений работы подтверждена качественным и количественным согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований (расхождение не превышает 5 %) и положительными результатами производственных исследований и испытаний.

Реализация результатов исследования. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработан и апробирован в производственных условиях экспериментальный образец универсального виброротационного сортирующего устройства для послеуборочной доработки картофеля, прошедшего производственные испытания в составе технологической линии при обработке более 340 тонн картофеля в период 2013 – 2014г. Разработанное устройство успешно внедрено в сельхозартели «Колхоз Маяк» Перемышльского района и КФХ «Братья Фетисовы» Думиничского района Калужской области, что подтверждено актами внедрения.

Личный вклад автора состоит в систематизации и анализе опубликованных результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации. Автор участвовал в постановке и решении теоретических и экспериментальных задач исследований по определению угловой скорости вращения вибророторов, параметров вибрации, деформации калибрующего отверстия, определению повреждений клубней. С его непосредственным участием создан экспериментальный образец устройства, проводились экспериментальные исследования, обработка и анализ результатов, а также участие в написании и подготовке статей.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-технической конференции в Брянской ГСХА (2004 г.); Всероссийских научно-технических конференциях «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (2007 – 2013 г.г.); региональной научно-практической конференции ФГБНУ «Калужский научно-исследовательский институт сельского хозяйства» (2013 г.); в Министерстве сельского хозяйства Калужской области (2013 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы получен 1 патент РФ на изобретение. Опубликовано 12 печатных работ, в том числе: 3 – в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 1 – в международном сборнике; 7 – в российских сборниках и 1 – в информационном бюллетене. Общий объем публикаций составил 3,95 п.л., из них лично соискателю принадлежит 0,94 п.л.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 105 наименований, в том числе 4 на иностранном языке и 5 электронных сайтов. Работа изложена на 136 страницах текста компьютерной верстки, содержит 10 таблиц, 35 рисунков и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проанализированы производственно-технологические предпосылки к научному исследованию по теме диссертации. Изучена и обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы, объект и предмет исследований, а также научная новизна, публикации и структура диссертации. Представлены основные положения работы, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние послеуборочной доработки картофеля и задачи исследований» проведен аналитический обзор рабочих органов и конструкций механических сортирующих и сепарирующих устройств, основанных на размерном признаке разделения компонентов вороха. Предложена классификация рабочих органов ротационных сепараторов с целью анализа развития и изыскания перспективного типа активного рабочего органа для сепарации примесей и сортирования клубней. По результатам изучения литературных, патентных и электронных источников, а также показателей работы известных сортировок предположена возможность создания универсального и высокоэффективного сортирующего устройства виброротационного типа.

Наибольший опыт в создании и испытании оборудования для послеуборочной доработки картофеля принадлежит учреждениям: НПО ВИСХОМ, ВНИИКС, ГНУ СЗНИИМЭСХ Россельхозакадемии, ВИМ, ГСКБ (г. Рязань). За рубежом разработкой и серийным изготовлением оборудования для послеуборочной доработки картофеля занимаются фирмы: Miedema B.V., Grimme (Голландия), Krukowski (Франция), APH Group (Нидерланды), Ekko (Дания) и др.

Анализ работ ученых по функционированию сортирующих устройств показал, что отдельные размерные признаки клубней, реализованные в механических сортирующих устройствах, не обладают принципиальными преимуществами перед другими. Анализ размерно-массовых характеристик клубней возделываемых сортов, приведенных в работах В.П. Горячина, Н.Н. Колчина и др., показывает, что толщина клубня относительно его ширины и длины отражает большее изменение массы клубня, то есть является более чувствительным параметром. Сортирование по толщине реализуется в щелевые калибрующие отверстия, которые позволяют ориентировать клубни в продольном направлении. Поэтому сортировки, основанные на разделении клубней по толщине, можно рассматривать как перспективные, дающие предпосылки к разработке универсальных виброротационных сортирующих поверхностей, позволяющих сепарировать примеси и сортировать клубни.

В соответствии с целью поставлены следующие **задачи исследования**:

– провести анализ процессов и устройств для сепарации примесей и сортирования клубней и обобщить результаты научных исследований с целью выявить перспективное направление исследований;

- разработать конструкцию и технологическую схему универсальной виброротационной сортирующей поверхности с целью повышения эффективности сортирования картофеля;

- теоретически и экспериментально обосновать рациональные параметры кинематики и вибрации рабочих органов новой виброротационной сортировки, обеспечивающих устойчивое перемещение и интенсивное ориентирование клубней в калибрующие отверстия;

- определить основные эксплуатационные показатели и экономическую эффективность применения экспериментального устройства.

Во второй главе «Теоретическое обоснование конструктивных параметров и режимов работы виброротационной сортировки» определены исходные конструктивные параметры вибророторов, выбрана и обоснована конструктивно-технологическая схема виброротационной сортировки, получены виброкинематические и технологические параметры работы нового устройства и силовые характеристики взаимодействия с клубнями.

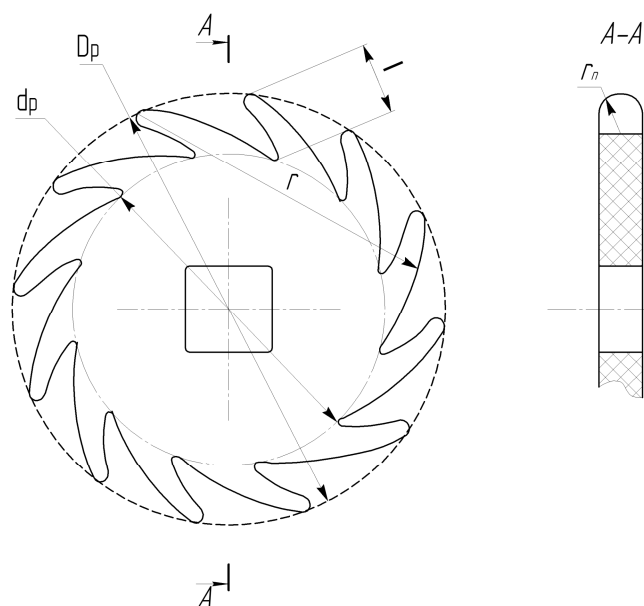


Рисунок 1 – Универсальный виброротор

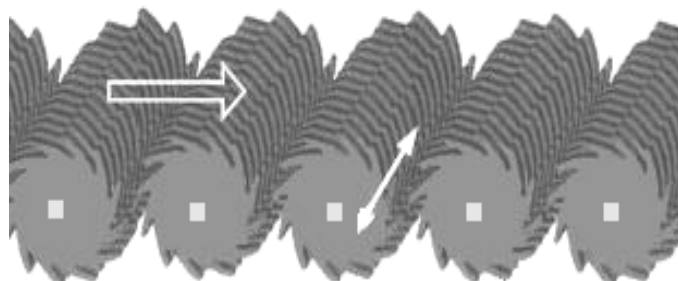


Рисунок – 2 Схема сортирующей поверхности

В результате теоретических изысканий предложена конструкция универсального виброротора (рисунок 1) и общая схема виброротационной поверхности для сепарации примесей и сортирования клубней [13].

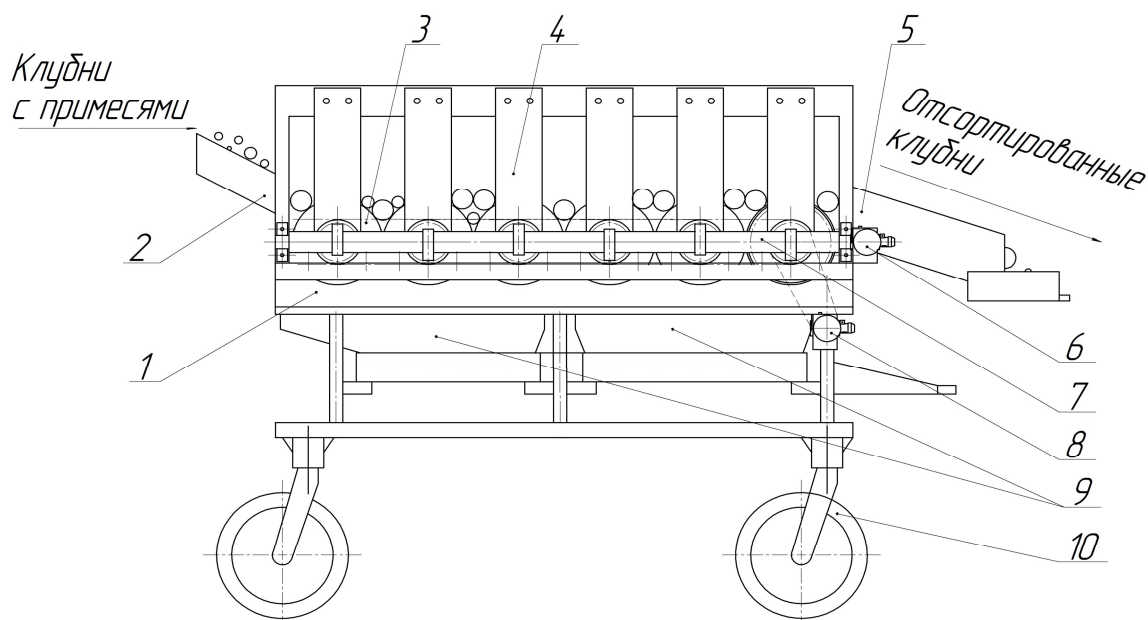
К основным конструктивным параметрам вибророторов относятся: наружный диаметр $D_p = 0,2 \text{ м}$, диаметр основания пальцеобразных выступов $d_p = 0,14 \text{ м}$, ширина виброротора $T = 0,02 \text{ м}$, количество выступов $n = 12 \text{ шт}$, длина выступов $l = 0,03 \text{ м}$ и радиус их скругления $r_n = 0,01 \text{ м}$.

Виброротационная сортирующая поверхность (рисунок 2) состоит из параллельных валов с установленными на них вибророторами, которые совмещают вращение и вибрацию в поперечном направлении. Соседние вибророторы, установленные на одном валу образуют между своими боковыми поверхностями щелевой формы и установлены на соседних валах без перекрытия.

Универсальная виброротационная сортировка (рисунок 3) содержит раму 1, установленную на самоустанавливающиеся опорные колеса 10 с прицепным устройством для транспортирования, приемного лотка 2 для рассредоточения и равномер-

ной подачи вороха картофеля на сортирующую поверхность, сортирующей поверхности в виде валов с вибророторами 3, установленных на упругих креплениях 4, мотор-редуктора 7 привода сортирующей поверхности, эксцентрикового вала 8 и вибропривода 6, выгрузных лотков 9 и лотка 5 с затаривающим устройством.

Каждый вал сортирующей поверхности установлен на упругих пластинах и имеет жесткую кинематическую связь с валом вибропривода. Валы вибрируют в поперечной плоскости относительно продольного перемещения сортируемой продукции в противофазе для уравнивания конструкции [8, 9].



- 1 – рама; 2 – приемный лоток; 3 – валы с вибророторами; 4 – упругие крепления валов с вибророторами; 5 – скатной лоток с затаривающим устройством; 6 – вибропривод; 7 – эксцентриковый вал вибропривода; 8 – мотор-редуктор; 9 – выгрузные лотки; 10 – самоуставляющиеся опорные колеса.

Рисунок 3 – Конструктивно-технологическая схема виброротационной сортировки

Сортировка предназначена для полнооперационной доработки вороха картофеля или малооперационной – без сортирования на фракции [1, 6]. При малооперационной обработке посредством загрузочного конвейера либо приемного бункера ворох картофеля подается на участок выделения примесей и фуража (клубней массой до 25 г). Далее путем непосредственного межоперационного перехода картофель поступает на следующий участок, где выделяется мелкая фракция. Средняя и крупная фракции идут в сход. Каждый из участков для сепарации примесей и сортирования клубней образован тремя рядами валов с вибророторами. Дополнительная переборка картофеля крупной и средней фракции может осуществляться на инспекционном столе.

При полнооперационной схеме обработки ворох картофеля подается на участок сепарации примесей, где одновременно выделяются и клубни мелкой фракции. Далее путем непосредственного межоперационного перехода картофель поступает на участок сортирования средней фракции. Клубни крупной фракции идут в сход. По ходу технологического процесса под каждым из участков установлены выгрузные лотки 9 для отвода выделенных фракций в выгрузные конвейеры для дальней-

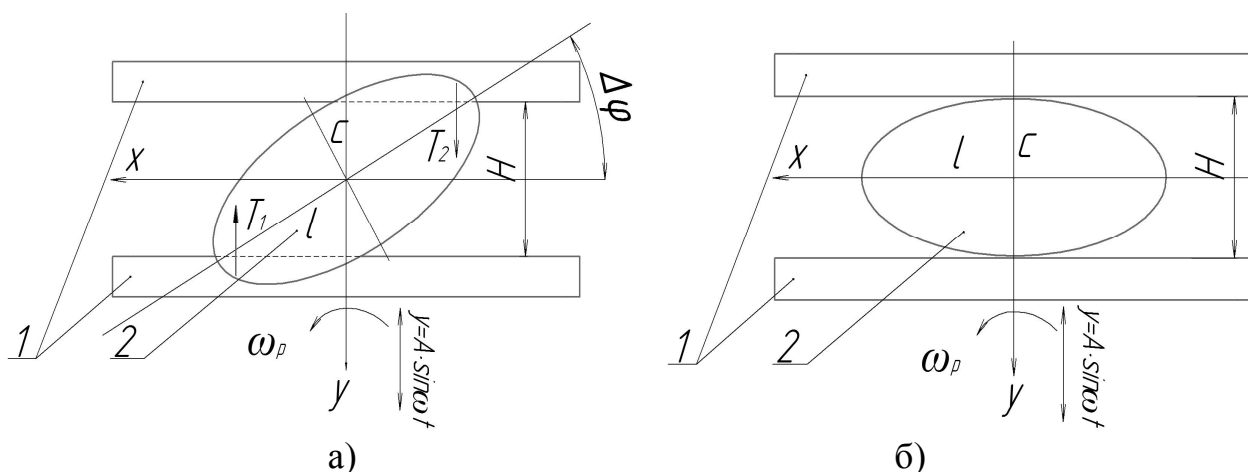
шего затаривания в емкости, погрузки в транспорт или закладки в закром на хранение.

Разработан бесступенчатый механизм регулирования сепарирующих и калибрующих зазоров между вибророторами в пределах от 20 до 60 мм.

Основная технологическая особенность данного устройства заключается в совмещении на одной рабочей поверхности операций выделения примесей и сортирования клубней, а также в обеспечении непосредственного межоперационного перехода клубней с участка сепарации на участки сортирования.

Предложенные в работе конструкция виброротора в сочетании с вибровозмущением рабочей поверхности предусмотрена для реализации направленного ориентирования клубней длинной осью эллипсоида вдоль калибрующего отверстия с целью повышения производительности и точности сортирования.

Для исследования процесса ориентирования клубня в калибрующее отверстие приняли позицию, что клубень захватывается соседними вибророторами, расположенными на одном валу, и его скольжение по ним отсутствует. Форма клубня – эллипсоид с полуосями: l и c с начальным углом положения клубня φ к продольной оси X отверстия [4, 7, 10] (рисунок 4).



1 – вибророторы; 2 – клубень.

а) – до начала ориентирования; б) – после ориентирования.

Рисунок 4 – Положение клубня над калибрующим отверстием (вид сверху)

При поперечных колебаниях вибророторов наибольшее возмущение поворота клубня возникает вокруг оси Z (направлена на нас). При этом образуется момент

$$M = -THtg\Delta\varphi, \quad (1)$$

где T – суммарная сила, действующая на клубень, H ($T = T_1 + T_2$);

H – расстояние между вибророторами, м (размер калибрующего отверстия);

$\Delta\varphi$ – угол между осью симметрии отверстия и осью l эллипсоида клубня, град.

Так как момент реакций направлен против угла отклонения, его можно считать восстанавливающим, т.е. поворачивающим и ориентирующим клубень в положение вдоль калибрующего отверстия. Поэтому поперечные колебания вибророторов способны создавать дополнительный поворачивающий момент, способствующий ускорению направленного ориентирования клубней.

Для обеспечения устойчивости перемещения клубней исследовали силы взаимодействия виброротора с клубнем при допущении, что клубень имеет форму шара и находится на вращающейся наружной грани виброротора в момент подъема и удержания [2] (рисунок 5).

Угловую скорость вращения вибророторов определили путем проецирования всех сил и моментов на оси x , y , z и получили систему уравнений

$$\begin{cases} m\ddot{x} = ma^n = F_{mp} - mg \cdot \cos \alpha, \\ m\ddot{y} = ma^r = N - mg \cdot \sin \alpha + m \cdot \omega_p^2 \cdot R_p, \\ J_z \ddot{\phi} = F_{mp} \cdot R_{кл} - M_T. \end{cases} \quad (2)$$

где m – масса клубня, кг;

α – угол, определяющий начальное положение клубня на вибророторе, град;

F_{mp} – сила трения качения ($F_{mp} = f \cdot mg \cdot \cos \alpha$), Н;

f – коэффициент трения качения ($f = 0,7$);

N – нормальная реакция пальцеобразного выступа виброротора, Н;

$(m \cdot \omega_p^2 \cdot R_p)$ – сила инерции, Н;

$R_{кл}$ – радиус клубня, м;

R_p – радиус виброротора, м;

M_T – момент сопротивления качению, $H \cdot м$ ($M_T = f \cdot N \cdot R_{кл}$).

В результате получили зависимость для определения угловой скорости вращения и расчетное значение $\omega_p = 5c^{-1}$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{g \cdot \sin \alpha}{R_p} - \frac{g \cdot \cos \alpha}{R_p}} \quad (3)$$

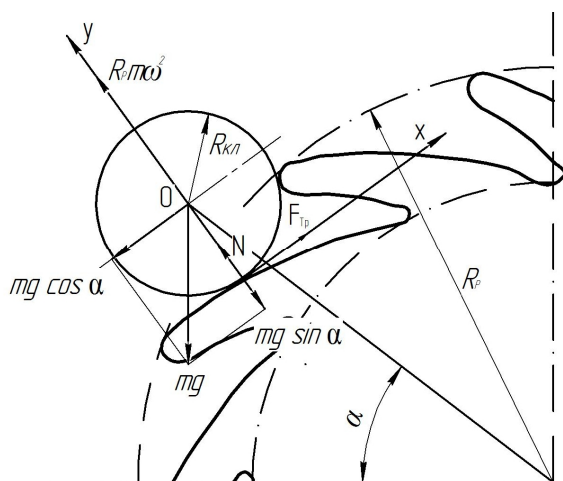
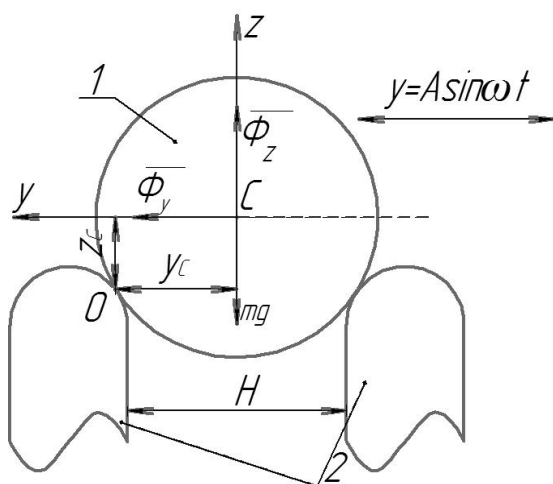


Рисунок 5 – Силы, действующие на клубень при контакте с виброротором



1 – клубень; 2 – вибророторы, образующие калибрующее отверстие.

Рисунок 6 – Силы, действующие на клубень при вибрации

Исходные параметры вибрации рабочих органов определили из условия, что отдельные клубни должны перемещаться устойчиво с частичной боковой подвижностью без подбрасывания [5] (рисунок 6).

Для определения момента начала отрыва клубня при интенсивной вибрации сортирующей поверхности и исключения эффекта ориентирования составили уравнение

$$\Phi_y < \frac{y_c}{z_c} (mg - m \cdot \omega_p^2 \cdot R_p), \quad (4)$$

где y_c – расстояние по оси y , от центра клубня до точки контакта с виброротором, м;

z_c – расстояние, по оси z , от центра клубня до точки контакта с виброротором, м.

Составили из (4) неравенство

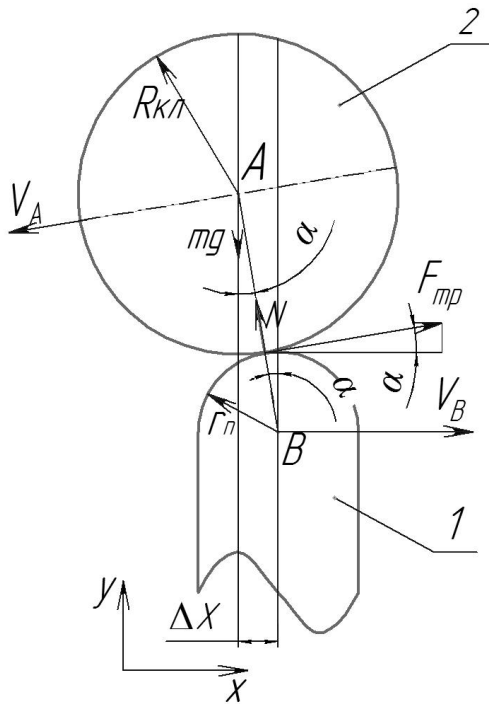
$$m \cdot A \cdot \omega_6^2 < \frac{y_c}{z_c} (mg - m \cdot \omega_p^2 \cdot R_p) \quad (5)$$

В результате получили выражение для определения частоты вибрации

$$\omega_6 < \sqrt{\frac{\frac{y_c}{z_c} (g - \omega_p^2 \cdot R_p)}{A}}, \quad (6)$$

что в переводе составило $\nu = 9,6 \text{ Гц}$.

Исследованиями установлено, что форма поверхности пальцеобразных выступов вибророторов будет определять эффективность процесса ориентирования и сортирования. Чем менее устойчивым будет положение клубня на поверхности виброротора, тем быстрее клубень переместится с него в калибрующее отверстие [11]. Поэтому вибрационное воздействие в поперечном направлении способствует смещению центра клубня относительно центра виброротора по схеме (рисунок 7). Для исследования процесса составили систему уравнений движения клубня



1 – виброротор; 2 – клубень.

Рисунок 7 – Силы, действующие на клубень, находящийся на пальцеобразном выступе сферической формы

$$\begin{cases} m\ddot{x} = m \cdot a^n = F_{mp} \cdot \cos \alpha \\ m\ddot{y} = m \cdot a^r = N \cdot \cos \alpha - mg \\ J_z \cdot \ddot{\varphi} = F_{mp} \cdot R_{кл} + mg \cdot (R_{кл} \cdot \sin \alpha) \end{cases} \quad (7)$$

Отсюда следует, что при смещении центра клубня относительно центра скругления пальцеобразного выступа виброротора будет возникать вращающий момент $mg \cdot (R_{кл} \cdot \sin \alpha)$. Следовательно, сферическая форма пальцеобразного выступа виброротора способствует ускорению перемещения клубня в калибрующее отверстие, что будет способствовать повышению эффективности сортирования и снижению точечной нагрузки на клубень от вибрации.

В результате получен радиус скругления пальцеобразного выступа виброротора в поперечном сечении $r_n = 10 \text{ мм}$.

Для определения стабильности геометрических размеров калибрующих отверстий определили величину деформации пальцеобразных выступов виброротора при контакте с клубнем (рисунок 8) и вероятность повреждения клубней при вибрационном действии [3].

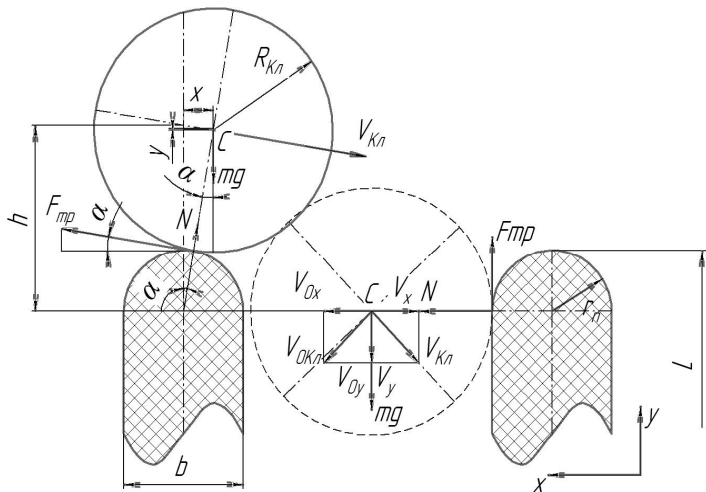


Рисунок 8 – Взаимодействие клубня с калибрующим отверстием

Скорость соударения получили из уравнения, определяющего движение клубня, по осям x и y :

$$x = \frac{-g \cos \alpha \sin \alpha + fg \cos^2 \alpha}{2} t^2 \quad (8)$$

$$y = \frac{g - fg \cos \alpha \sin \alpha - g \cos^2 \alpha}{2} t^2 \quad (9)$$

Расчетная скорость соударения клубня составила $V_{кл} = 0,059 \text{ м / с}$.

Интенсивность соударения исследовали на основании теоремы импульсов:

$$m V_{ox} - m V_x = P \tau \quad (10)$$

$$m V_{oy} - m V_y = f P \tau, \quad (11)$$

где V_x и V_y – проекции скорости клубня по осям координат, м/с;

V_{ox} и V_{oy} – проекции скорости отражения клубня, м/с;

P – значение ударной нормальной реакции, Н;

τ – время контакта, с.

В результате получили значение ударной нормальной реакции $P = 0,379 \text{ Н}$ и значение деформации пальцеобразного выступа виброротора $\delta_{дин} = 1,025 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, которое практически не изменяет геометрию и установленные размеры калибрующего отверстия.

Исследуя удар клубней о металлическую плиту, В.И. Табачук установил, что повреждения клубней начинаются при поглощении ими энергии $W = 0,078 - 0,18 \text{ Дж}$. Расчетное значение энергии, поглощаемой клубнем при взаимодействии с виброротором, составляет $W = 0,00004 \text{ Дж}$, что исключает его повреждения.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» представлена программа и описана методика проведения экспериментов в лабораторных и производственных условиях.

Программой лабораторных исследований предусматривалось разработать конструкторскую документацию и изготовить экспериментальный образец универсальной виброротационной сортировки; исследовать процесс перемещения и ориентирования клубней, а также сепарации примесей при изменении режимов кинематики и вибрации; исследовать совместное действие основных факторов на процесс сортирования клубней и определить их рациональные значения.

Программой экспериментальных исследований в производственных условиях предусматривалось исследование согласованности и технологической универсаль-

ности функционирования участков сепарации примесей и сортирования клубней; провести оценку устройства при обработке вороха картофеля повышенной влажности и с большим содержанием примесей.

На базе лаборатории кафедры «Автомобиле- и тракторостроение» изготовили экспериментальный образец виброротационной сортировки (рисунок 9).



Рисунок 9 – Экспериментальный образец виброротационной сортировки (а) и сортирующая поверхность (б)

Для исследования совместного влияния факторов на критерий оптимизации, в качестве которого принята точность сортирования клубней, выполнили планирование факторного эксперимента, провели эксперименты и выполнили обработку результатов. Получили математическую модель процесса сортирования и оценили ее адекватность. В качестве факторов выбраны следующие: q – подача вороха, кг/с; ω_p – угловая скорость вращения вибророторов, c^{-1} ; ν – частота вибрации, Гц;

На основании поисковых опытов и методов планирования экспериментальных исследований выбрали факторы и уровни их варьирования, выполнили их кодирование и составили матрицу планирования (таблица 1).

Таблица 1 – Условия эксперимента

Уровень	$x_1, \text{ кг / с}$	x_2, c^{-1}	$x_3, \text{ Гц}$
Верхний (+1)	5	6	15
Основной (0)	4	5	10
Нижний (–1)	3	4	5

Неизвестную функцию отклика аппроксимировали полиномом вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{12}x_2^2 + b_{13}x_3^2, \quad (12)$$

где $b_0, b_1, \dots, b_i$ – коэффициенты регрессии при соответствующих переменных.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований виброротационной сортировки» обработаны и представлены данные, полученные в лабораторных и производственных условиях.

В результате лабораторных опытов выявили, что параметры вибрации $A=3\text{ мм}$ и $\nu=9,6\text{ Гц}$ обеспечивают эффективную подвижность клубней в пределах

калибрующих отверстий без отрыва от поверхности. Параметры $A=1,5\text{мм}$, $\nu=5\ldots 15\text{Гц}$ приводят к малой подвижности клубней, а при $A=4,5\text{мм}$ и $\nu=10\ldots 15\text{Гц}$ наблюдается отрыв клубней.

Траектории перемещения клубней в зависимости от изменения угловой скорости вращения вибророторов представлены на рисунке 10.

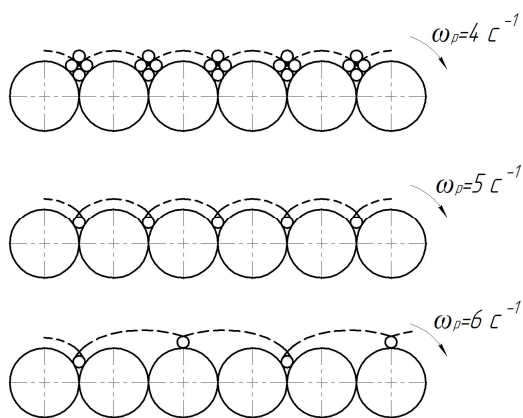


Рисунок 10 – Траектории перемещения клубней при изменении ω_p

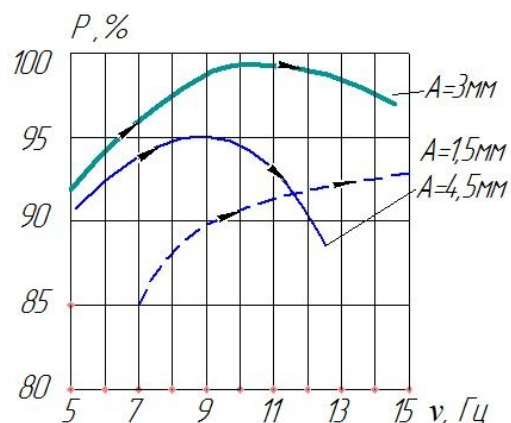


Рисунок 11 – Зависимость полноты сепарации примесей от вибрации

Установили, что определяющим фактором, влияющим на режим перемещения клубней, является угловая скорость вращения вибророторов, рациональные пределы которой составляют $\omega_p = 5\ldots 5,5\text{ c}^{-1}$ и обеспечивают устойчивое перемещение клубней без отрыва при подаче $q = 4\ldots 5\text{ кг/с}$ (14,4...18 т/ч).

На рисунке 11 представлены результаты исследования процесса сепарации примесей, где выявлены значения $A=3\text{мм}$, $\nu=10\text{Гц}$ и $\omega_p=5,5\text{ c}^{-1}$, обеспечившие полноту сепарации $P=98\%$ для выполнения малооперационной обработки вороха картофеля с производительностью до 18 т/ч. Количественный состав вороха в опыте был следующим: 65 % – клубней, 35 % – примесей, в т.ч. 30 % – просеивающейся почвы, 5 % – растительных примесей при влажности 27...30 %.

Анализ ориентирования клубней показал, что значения $\nu=9,6\text{Гц}$, $A=3\text{мм}$ и $\omega_p=5\text{ c}^{-1}$ обеспечивают направленное ориентирование клубней (рисунок 12, 13) при значении общей точности сортирования $K=90\ldots 93\%$ при подаче $q=4\text{ кг/с}$.



Рисунок 12 – Ориентирования клубней

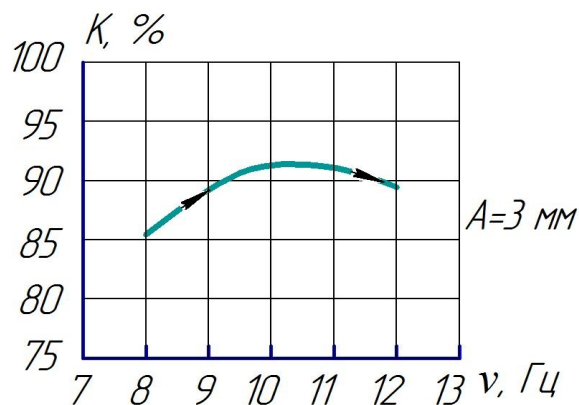


Рисунок 13 – Зависимость точности сортирования от параметров вибрации

В результате обработки данных полнофакторного эксперимента получили уравнение, описывающее зависимость точности сортирования от управляемых факторов: q – подачи вороха кг/с ; ω_p – угловой скорости вращения вибророторов с^{-1} и ν – частоты вибрации, Гц

$$y = 73,56\omega_p + 9,258\nu + 62,9q - 6,9\omega_p^2 - 0,276\nu^2 - 8,2q^2 - 0,64\omega_p\nu + 0,2\omega_pq - 0,16\nu q - 254,82 \quad (13)$$

Экспериментальные исследования проводили на картофеле сорта «Удача», состав был следующим: 48 % – клубней крупной фракции с коэффициентом формы $K_\phi = 1,31$; 33 % – средней с $K_\phi = 1,27$ и 19 % – мелкой с $K_\phi = 1,21$.

Построили поверхности отклика и провели анализ их двумерных сечений (рисунки 14, 15). В результате оптимизировали значения частоты вибрации $\nu = 9,8 \text{ Гц}$, угловой скорости вращения вибророторов $\omega_p = 4,9 \text{ с}^{-1}$ и подачи клубней $q = 3,8 \text{ кг/с}$.

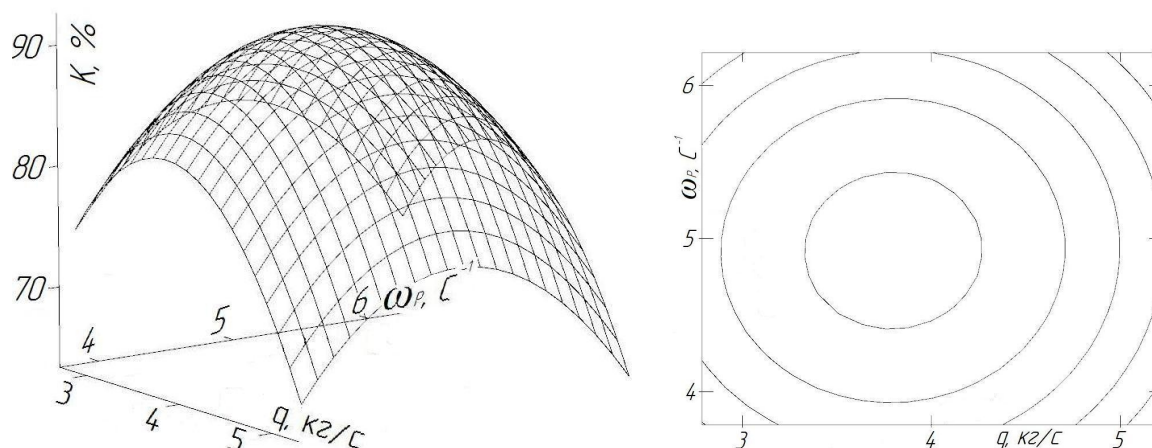


Рисунок 14 – Поверхность отклика и ее контурный график, характеризующие точность сортирования картофеля K при изменении факторов ω_p и q при постоянной величине фактора $\nu = 10 \text{ Гц}$

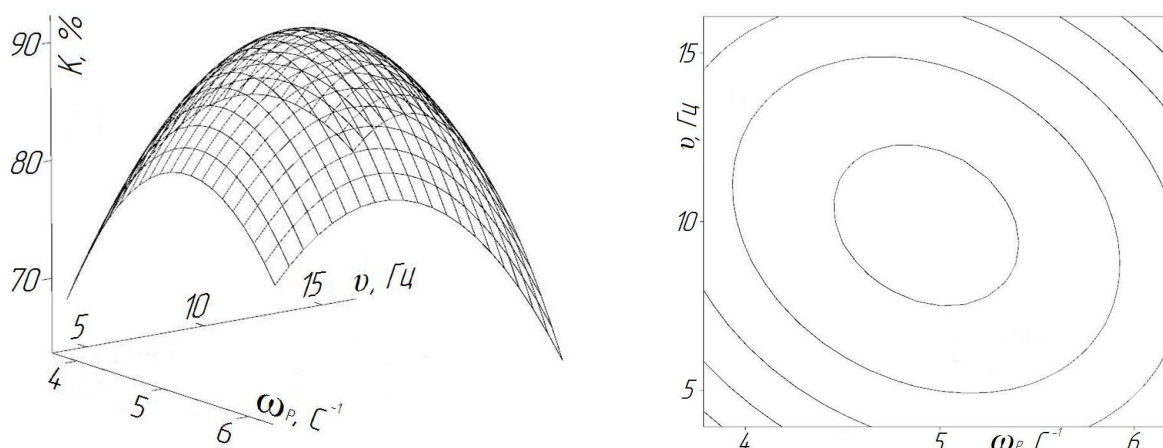


Рисунок 15 – Поверхность отклика и ее контурный график, характеризующие точность сортирования картофеля K при изменении факторов ν и ω_p при постоянной величине фактора $q = 4 \text{ кг/с}$

Исследования в производственных условиях показали, что обеспечивается устойчивое перемещение и эффективное сортирование вороха картофеля [12]. Выполнили оценку универсальности экспериментальной сортировки при полнооперационной и малооперационной обработке вороха картофеля. В процессе полнооперационной обработки полнота сепарации примесей составила 95 %, точность сортирования 92 % при $\omega_p = 4,9 \text{ с}^{-1}$ и подаче $q = 3,8 \text{ кг/с}$ (13,7 т/ч). По второй схеме полнота сепарации 98 % при $\omega_p = 5,5 \text{ с}^{-1}$ и $q = 5 \text{ кг/с}$ (18 т/ч), повреждения клубней до 1,5 %.

Подтверждена технологическая надежность виброротационной сортировки при обработке вороха повышенной влажности до 35 % и содержании почвенных и растительных примесей до 40 %. Рабочая поверхность самоочищается, отсутствует налипание почвы и забивание комками рабочих отверстий сортировки.

После обработки 340 тонн вороха картофеля обеспечена полная работоспособность и параметры сепарирующих и калибрующих отверстий.

В пятой главе «Экономическая эффективность использования универсальной виброротационной сортировки» приведены результаты производственных исследований в сельхозартели «Колхоз Маяк» Перемышльского района Калужской области в 2013 – 2014 годах.

Для сравнения технико-экономических показателей и определения годового экономического эффекта за прототип принята сортировальная машина С6РК 15. Годовой экономический эффект от разработанного технического решения составляет около 130 тыс. руб. (в ценах 2013 г.).

Виброротационная сортировка по сравнению с сортировальной машиной С6РК 15 обеспечивает снижение приведенных затрат на 23 %, удельной металлоемкости на 38 % и энергоемкости на 14 %.

Заключение

1. В результате проведенных исследований предложена конструкция, технологическая схема и изготовлен экспериментальный образец универсальной виброротационной сортировки, обеспечивающий повышение производительности и точности сортирования картофеля (патент на изобретение РФ № 2489067 RU);

2. Теоретически определены основные параметры виброротационной сортировки: наружный диаметр виброротора – $D_p = 0,2 \text{ м}$, диаметр основания пальцеобразных выступов – $d_p = 0,14 \text{ м}$, ширина виброротора – $T = 0,02 \text{ м}$, количество выступов – $n = 12 \text{ шт}$, длина выступов – $l = 0,03 \text{ м}$, радиус скругления – $r_n = 0,01 \text{ м}$, угловая скорость вращения вибророторов – $\omega_p = 5 \text{ с}^{-1}$, частота вибрации – $\nu = 9,6 \text{ Гц}$ и амплитуда – $A = 3 \text{ мм}$, обеспечившие ориентирование клубней, повышение производительности и точности сортирования.

3. Определено отклонение размеров калибрующих отверстий между вибророторами $\delta_{\text{дин}} = 1,025 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ при контактных взаимодействиях с клубнями ($V_k = 1,32 \text{ м/с}$) и отсутствие вероятности их повреждения при значении передаваемой энергии $W = 0,00004 \text{ Дж}$.

4. Экспериментально получена математическая модель процесса сортирования и оптимизированы параметры: подача вороха $q = 3,8 \text{ кг/с}$, угловая скорость вращения вибророторов $\omega_p = 4,9 \text{ с}^{-1}$, частота вибрации $\nu = 9,8 \text{ Гц}$, амплитуда $A = 3 \text{ мм}$, длина участка сепарации – 0,6 м и сортирования – 0,6 м.

5. Применение вибрации повысило качество технологических процессов на 17...24 % по сравнению с использованием данной сортировки без вибрации.

6. Производственные испытания подтвердили универсальность сортировки в процессе полнооперационной и малооперационной обработки вороха с показателями: $P = 95...98 \%$ и $K = 90...92 \%$ при производительности 13,7...18 т/ч.

Годовой экономический эффект от разработанного технического решения составляет около 130 тыс. руб. (в ценах 2013 г.) при использовании одной виброротационной сортировки. Разработанная конструкция виброротационной сортировки по сравнению с сортировальной машиной С6РК 15 обеспечивает снижение приведенных затрат на 23 %, удельной металлоемкости на 38 %, и энергоемкости на 14 %.

Образец документации в 2013 году передан в ООО ЦИМП «Калужский бауманец» для организации выпуска и внедрения опытной партии сортировок.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Статьи в рецензированных журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Алакин В.М. Комплект для доработки картофеля и овощей / В.М. Алакин, С.А. Плахов, В.И. Еремеев // Картофель и овощи. – 2012. – № 8. – С. 11 – 13.

2. Колчин Н.Н. Универсальный виброротационный сепаратор для послеуборочной доработки картофеля / Н.Н. Колчин, В.М. Алакин, С.А. Плахов // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 2. – С. 9 – 11.

3. Колчин Н.Н. Взаимодействие клубней с рабочей поверхностью виброротационной сортировки / Н.Н. Колчин, В.М. Алакин, С.А. Плахов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2014. – № 2. – С. 29 – 34.

Статьи в других изданиях:

4. Алакин В.М. Изыскание параметров виброкинематики сепарирующе-сортирующих роторов в системе координат для обработки вороха картофеля / В.М. Алакин, С.А. Плахов // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 10 – 12 декабря 2008 г., т. 1 – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – С. 254 – 258.

5. Колчин Н.Н. Обоснование основных параметров виброротационной сортировки картофеля // Н.Н. Колчин, В.М. Алакин, С.А. Плахов // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России: Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 145-летию со дня рождения основоположника земледельческой механики академика В.П. Горячкина. Часть 1. Москва 2013 – С 277 – 280.

6. Плахов С.А. Исследование работы роторно-пальцевой комбинированной поверхности для отделения примесей и калибрования картофеля / С.А. Плахов, В.М. Алакин // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 6 – 8 декабря 2005 г., т. 1 – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – С. 242 – 244.

7. Плахов С.А. Исследование технологического процесса виброротационной сортировки картофеля / С.А. Плахов, В.М. Алакин // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 5 – 7 декабря 2006 г., т. 1 – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – С. 233 – 236.

8. Плахов С.А. Исследование процессов и устройств реализации виброкинematики роторно-пальцевых рабочих органов / С.А. Плахов, В.М. Алакин // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 10 – 12 декабря 2008 г., т. 1 – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – С. 251 – 254.

9. Плахов С.А. Разработка и испытание вибро-кинematического привода сортировки картофеля роторно-пальцевой конструкции / С.А. Плахов, В.М. Алакин // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 17 – 18 декабря 2009 г., т. 1 – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – С. 280 – 284.

10. Плахов С.А. Исследование процесса ориентирования клубней при вибрационном действии роторов / С.А. Плахов // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 7 – 9 декабря 2010 г., т. 1 – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – С. 306 – 308.

11. Плахов С.А. Обоснование формы пальцев ротора виброротационной сортировки / С.А. Плахов В.М. Алакин, Г.С. Никитин // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 4 – 6 декабря 2012 г., т. 2 – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – С. 127 – 133.

12. Плахов С.А. Результаты разработки и внедрения виброротационной сортировки картофеля / С.А. Плахов – Калуга.: Издательство КЦДО, 2014. – 12 с.

Патенты

13. Пат 2489067 Российская Федерация МПК A23N. Установка для послеуборочной обработки плодоовощной продукции (варианты) [Текст] / Алакин В.М., Плахов С.А., Верещака С.П.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Центр инноваций и молодежного предпринимательства «Калужский бауманец» (RU). – №2011150170; заявл. 09.12.2011; опубл. 10.08.2013, Бюл. № 22. – 13 с.: ил.

Просим принять участие в работе диссертационного совета Д 220.010.04 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учёному секретарю. Телефон (473) 253-75-35, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Плахов Сергей Александрович

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ОСНОВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ВИБРОРОТАЦИОННОЙ СОРТИРОВКИ КАРТОФЕЛЯ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 30.09.2014 . Формат 60х90¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. п.л. 1,0. Гарнитура Таймс. Тираж 110 экз.

Заказ 08/2014

Отпечатано отделом оперативной полиграфии Калужского центра
научно-технической информации – филиала ФГБУ «РЭА» Минэнерго России
248000, г. Калуга, пл. Старый Торг, 9