

Калужский филиал федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана»

На правах рукописи



Плахов Сергей Александрович

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

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – доцент,
кандидат технических наук
Алакин Виктор Михайлович

Калуга – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Состояние послеуборочной доработки картофеля и задачи исследования.....	12
1.1. Анализ способов выделения примесей и конструкций сепараторов.....	12
1.2. Анализ способов и устройств для сортирования картофеля.....	24
1.3. Влияние вибрации на интенсификацию технологических процессов.....	40
2. Теоретическое обоснование конструктивных параметров и режимов работы виброротационной сортировки.....	44
2.1. Определение основных параметров конструкции универсального виброротора для сепарации примесей и сортирования клубней.....	44
2.2. Ориентирования клубней вибророторами.....	46
2.3. Обоснование конструктивно-технологической схемы виброротационной сортировки.....	49
2.4. Исследования перемещения клубней по сортирующей поверхности...	53
2.5. Обоснование формы пальцеобразных выступов вибророторов.....	57
2.6. Определение параметров вибрации и силовых характеристик взаимодействия клубней с вибророторами.....	62
3. Программа и методика экспериментальных исследований.....	72
3.1. Программа экспериментальных исследований.....	72
3.2. Методика проведения экспериментов в лабораторных условиях.....	74
3.2.1. Исследования устойчивости перемещения клубней и сепарации примесей.....	74
3.2.2. Исследования по ориентированию и сортированию клубней.....	78

3.2.3. Методика проведения многофакторного эксперимента.....	80
3.3. Планирование экспериментальных исследований в производственных условиях.....	88
3.4. Методика экспериментальных исследований в производственных условиях.....	89
3.5. Объект исследований.....	91
4. Результаты экспериментальных исследований виброротационной сортировки.....	95
4.1. Лабораторные исследования устойчивости перемещения клубней и эффективности сепарации примесей.....	95
4.2. Определение размерно-массовых и статистических характеристик клубней.....	101
4.3. Лабораторные исследования ориентирования и сортирования клубней.....	102
4.4 Анализ результатов полнофакторного эксперимента по определению точности сортирования.....	106
4.5. Результаты исследований в производственных условиях.....	113
5. Экономическая эффективность использования виброротационной сортировки.....	119
Заключение.....	124
Список литературы.....	126
Приложения.....	137

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Картофель относится к важнейшим сельскохозяйственным культурам, производимым во всем мире и в России. Членство России в ВТО, ставит отечественных производителей в жесткие конкурентные рамки. Доктрина продовольственной безопасности России подразумевает обеспечения населения продуктами питания собственного производства не менее 95 % от общей потребности, в том числе, и картофелем.

По данным Росстата РФ и Министерства сельского хозяйства Калужской области, за последние годы посадочные площади под картофелем в хозяйствах всех категорий по России, Центральному Федеральному округу и Калужской области в частности, остаются стабильными примерно на одном уровне с незначительными колебаниями таблица 1.

Таблица 1 – Посадочные площади под картофелем в хозяйствах всех категорий

Регион	Годы			
	2010	2011	2012	2013
Всего по РФ, тыс.га	2212	2225	2244	2133
Центральный Федеральный округ, тыс.га	651	662	668	660
Калужская область, тыс.га	22,1	23,2	23,4	21,1

Средняя урожайность производимого в России картофеля за последние годы составляет 12,5 т/га, что почти в 2,7 раза ниже, чем в странах Западной Европы, где аналогичный показатель находится на уровне 33,5 т/га. Товарное качество производимой продукции зачастую невысокое, а общие потери на пути поле – потребитель в ряде случаев достигают 30 % и более. Следствием подобной ситуации являются большие трудозатраты, связанные с подготовкой семенного материала

(около 36 %), уборкой и послеуборочной доработкой картофеля (до 80 %), а также высокий процент отходов продукции (до 20 %).

В значительной мере это обусловлено технологическими недостатками оборудования для послеуборочной доработки вороха картофеля, применяемыми технологиями, качеством посадочного материала, значительной долей ручного труда и зависимостью от почвенно-климатических условий [18, 27].

В последнее время наблюдается интенсивный рост вложения инвестиций в технологическое развитие фермерских и сельскохозяйственных организаций, увеличивается спрос на новую высокоэффективную и недорогую технику для картофелеводства, наметилась тенденция перехода производства картофеля на малозатратные, эффективные и адаптированные машинные технологии, что обусловлено интересами бизнеса и развитием малого предпринимательства в сельском хозяйстве.

В сельскохозяйственных организациях и крестьянских (фермерских) хозяйствах, по данным Министерства сельского хозяйства РФ, наблюдается увеличение урожайности, что связано с применением машинных технологий производства [63].

В настоящее время потребительская актуальность картофелеводства увеличивается следовательно, повысить конкурентоспособность и экономическую эффективность производства картофеля возможно внедрением прогрессивных технологий, сопровождаемых высокоэффективным технологическим оборудованием, адаптированным к хозяйственным и почвенно-климатическим условиям России.

Ворох картофеля, убранный комбайнами, может содержать до 30 % почвенных и растительных примесей при влажности до 30 % и более. По этой причине происходит залипание и забивание почвой рабочих поверхностей сепараторов и сортировок, снижается сепарирующая способность и точность сортирования клубней, возникают технологические отказы [16, 55, 56, 87,].

Получение картофеля без примесей, непосредственно из-под комбайна, возможно лишь при выполнении всех агротехнических требований и в оптимальных условиях уборки. Поэтому эффективная послеуборочная доработка картофе-

ля имеет важное технологическое значение для хранения, товарной и предпосадочной подготовки клубней. Содержание примесей в ворохе картофеля, закладываемом на длительное хранение, по данным ВНИИКХ, не должно превышать 15 %. Эффективное выделение почвенных и растительных примесей, мелких и некондиционных клубней из вороха, поступающего с поля, является основной задачей. Поэтому для выделения примесей необходимо применять высокоэффективные сепараторы, адаптированные к наиболее неблагоприятным почвенно-климатическим условиям (тяжелые и переувлажненные почвы, большое содержание почвенных примесей и растительных остатков в убранном картофеле).

Следующим важным этапом послеуборочной доработки картофеля является разделение клубней на фракции при условии минимального их повреждения, особенно семенного материала. Использование высококачественного посадочного материала способствует повышению эффективности картофелеводства. Для этого необходимо обеспечить щадящую обработку клубней в послеуборочный период при взаимодействии с технологическим оборудованием.

Обязательным требованием к оборудованию для разделения клубней на фракции является обеспечение точности сортирования, в том числе, при неблагоприятных условиях уборки и хранения (повышенная влажность, налипшая почва, наличие примесей и т.д.). Для этого необходимо оборудование обеспечивающее стабильность калибрующих отверстий, самоочистку рабочих органов в процессе работы, возможность быстрого изменения размеров калибрующих отверстий в широком диапазоне и т.д.

Решение этих задач связано с созданием и применением новых высокопроизводительных, универсальных и технологически надежных рабочих органов сепараторов и сортировок [89].

Основное требование к данному оборудованию – это обеспечение необходимого качества и надежности выполнения технологических процессов выделения примесей и разделение картофеля на фракции при минимальном повреждении клубней [33]. Содержание примесей в обработанном продукте по требованиям ГОСТ Р 53136 – 2008 допускается не более 2 %, точность разделения на фракции

не ниже 97 %, общее количество повреждённого картофеля не должно превышать 3 % исходного объёма. По оценкам качественных показателей применяемого в хозяйственных условиях оборудования для доработки картофеля выявлены результаты далеко несоответствующие требованиям стандартов. Содержание примесей в обработанном ворохе находится в пределах 5...10 %, точность разделения на фракции в пределах 70...80 %, а повреждения клубней достигают 8 % и более. Для выполнения всего комплекса операций в указанных условиях хозяйства должны приобретать сложные, громоздкие и дорогие наборы технологического оборудования.

Поэтому для повышения эффективности производства картофеля в условиях различных форм хозяйствования необходимо решать вопросы создания и применения универсальных машин с низкой материалоемкостью и доступной стоимостью. Решение указанных вопросов возможно путем создания универсальных и надежных рабочих поверхностей сортировок с высокой технологической и экономической эффективностью их применения в хозяйствах. Новые машины и реализуемые ими процессы послеуборочной доработки картофеля должны быть функционально адаптированы к наиболее неблагоприятным хозяйственным и почвенно-климатическим условиям производства. Кроме этого, они должны обладать высокой технической и технологической надежностью, эффективностью и универсальностью применения.

Создание новых конструкций машин и технологических процессов должно сопровождаться производством оборудования различного типоразмера, универсального назначения и производственного применения [31, 103, 105].

Основываясь на передовом отечественном и зарубежном опыте создания и совершенствования техники для послеуборочной обработки картофеля перспективным направлением является разработка универсальных устройств, которые образованы из последовательной комбинации сепарирующих и сортирующих рабочих органов. Это создает предпосылки для снижения повреждений продукции за счет минимального числа переходов и единиц технологического оборудования, предусматривает повышение эффективности и качества функционирования, сни-

жение материало-энергоёмкости оборудования и, как следствие, повышение конкурентоспособности и качества продукции.

В связи с вышеизложенным, проблема изыскания и разработки рабочих органов для универсальных сортирующих устройств и повышение производительности и точности сортирования клубней является актуальной.

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 послеуборочной доработки картофеля.

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

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.

В соответствие 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, обеспечивающие устойчивое перемещение и интенсивное ориентирование клубней в калибрующие отверстия;

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

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 плодоовощной 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.

Теоретическую и практическую значимость работы представляют:

- методика определения безотрывного перемещения клубней по сортирующей поверхности при сочетании вращательного и вибрационного действия рабочих органов;

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

- разработан 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.

Методология и 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 сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований (расхождение не превышает 5 %) и положительными результатами производственных исследований и испытаний.

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 ГНУ «Калужский научно-исследовательский институт сельского хозяйства РАСХН» (2013 г.); в Министерстве сельского хозяйства Калужской области (2013 г.). Разработанное устройство успешно внедрено в сельхозартели «Колхоз Маяк» Перемышльского района и КФХ «Братья Фетисовы» Думиничского района Калужской области, что подтверждено актами внедрения. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждено соответствующей справкой.

Публикации. По теме диссертационной работы получен 1 патент РФ на изобретение. Опубликовано 3 печатные работы в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Общий объем публикаций составил 3,95 п.л., из них лично соискателю принадлежит 0,94 п.л.

Структура и содержание диссертации. 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, 38 рисунков и 5 приложений.

1. Состояние послеуборочной доработки картофеля и задачи исследования

1.1. Анализ способов выделения примесей и конструкций сепараторов

Послеуборочная и предпосадочная доработка картофеля предусматривает сепарацию почвенных и растительных примесей, выделение мелких и некондиционных клубней и сортирование. Указанные операции имеют важное технологическое значение для создания благоприятных условий во время хранения при естественной и активной вентиляции клубней, а также влияют на снижение общих потерь картофеля в период хранения, повышения качества процесса сортирования и товарной подготовки клубней [16, 29, 56, 64].

Примеси, в виде свободной почвы и растительных остатков, выделяют с помощью специальных механизмов различных конструкций. Эффективность процесса сепарации в значительной степени определяют виды, влажность и физико-механические свойства примесей, в том числе комков почвы и растительных остатков, поступающих с картофелем. В настоящее время применяется несколько основных технологических приемов отделения примесей от картофеля, эффективность которых характеризуется степенью повреждения клубней, производительностью устройств и полнотой выделения соответствующего вида примесей [29, 95, 105].

Реализация процессов сепарации примесей основана на различии физико-механических свойствах компонентов вороха картофеля. Известна классификация признаков разделения [35, 56], по которым может быть произведена сепарация примесей. Сепарирующие устройства должны удовлетворять агротехническим требованиям. Согласно ГОСТ Р 53136 – 2008 наличие земли и посторонних примесей по массе не должно превышать 1 % и согласно ГОСТ Р 51808 – 2001 количество поврежденных клубней по массе не более 2 %. При наличии в ворохе боль-

шого количества примесей повышенной влажности, рабочие органы сепараторов должны функционировать без налипания почвы и забивания [6, 58].

На основе признаков разделения [55, 66] можно классифицировать отделители клубней от примесей на две группы:

- а) автоматические электронные универсальные устройства;
- б) механические устройства;

Отделители первой группы основаны на контроле каждого тела, находящегося в ворохе по следующим признакам разделения: цвет, блеск, флуоресценция, степень поглощения различного вида излучения, электрические, акустические свойства и т.д.

Автоматические отделители могут обеспечить полное отделение клубней от примесей, а также выделение камней. Теоретическими предпосылками и экспериментальными исследованиями автоматических отделителей в нашей стране занимались Ф.И. Батяев, Н.Н. Колчин, С.Н. Крошенинников, Г.Д. Петров, В.А. Срапеняц, Н.В. Шабуров и др. В лабораторных условиях эти отделители обеспечивают устойчивое разделение вороха с выделением примесей в пределах 95 – 98 %. Применение этих устройств в условиях большинства картофелепроизводящих хозяйств России ограничено из-за сложности оборудования, высокой стоимости, необходимости предварительной и тщательной очистки от почвы и мойки клубней, невысокой надежности в работе и требующих высококвалифицированного персонала.

Поэтому на данный момент на этапе послеуборочной доработки картофеля в России автоматические отделители не нашли широкого применения.

Многие ведущие фирмы мира – английские Downs, Vare – Grabers, Herbert, голландская – Miedema BV, немецкая – Grimme, APH Group (Нидерланды), Ekko (Дания) и др. уделяют большое внимание разработке механических сепараторов, которые широко используют при послеуборочной доработке картофеля [31, 38, 48, 65, 83, 84].

Механические отделители способны обрабатывать получаемый с поля ворох без предварительной подработки, что позволяет создавать высокопроизводительные сепараторы.

Чувствительность устройств к различиям физико-механических свойств клубней и примесей определяет возможность и качество сепарации. Поэтому, изучение возможности разделения указанным методом основано на исследовании физико-механических свойств клубней и примесей, которые провели Н.Н. Колчин, М.Е. Мацепуро, Г.Д. Петров, И.М. Полуночев, К.А. Пшеченков, В.М. Чаус, Н.В. Шабуров, за рубежом V. Baganz, E. Shefer и др.

Отделение клубней от примесей в механических сепараторах основано на следующих физико-механических свойствах: коэффициенты формы, коэффициенты трения, коэффициенты восстановления скорости, масса, плотность, размер и прочностные свойства [19, 74, 78, 82,]. Из всех этих свойств наибольшую практическую реализацию в механических сепараторах получили: коэффициенты трения качения и скольжения, а также размерный признак.

К отделителям, работа которых основана на признаках разделения – коэффициенты трения скольжения и качения принадлежат продольные и поперечные пальчатые горки или комбинации горок. Подобные отделители просты по конструкции, способны обрабатывать ворох без предварительной подработки, работают практически без повреждения клубней, при этом они выделяют 50 – 80 % клубней и 50 – 90 % почвы [56, 66].

Горки с пальчатой поверхностью выделяют растительные остатки и мелкие почвенные примеси. Почвенные примеси проваливаются между пальцами, а растительные остатки удерживаются на их концах, способствуя лучшему их отделению.

Общая длина горки, для качественного выделения растительных остатков и мелких почвенных примесей, должна составлять около 1...1,5 м, при угле наклона рабочей поверхности $\alpha_z = 45...55^\circ$ [43, 66].

Выделение почвенных и растительных примесей возможно также с помощью поперечных пальчатых горок. Они имеют аналогичный принцип действия и

располагаются одна за другой так, что обрабатываемый продукт под действием силы тяжести перемещается с одной горки на другую. Угол наклона рабочей поверхности составляет $10...20^\circ$ при скорости потока $Q_n = 0...2,5 \text{ м/с}$ [43, 66].

К недостаткам подобных отделителей можно отнести ограниченную производительность, связанную с необходимостью подачи клубней в один слой и зависимость от влажности обрабатываемого материала. При наличии большого количества (до 40 %) сильно влажной почвы (до 30 %) поверхность горки может залипать и полотно из пальчатого превращается почти в гладкое, а растительные примеси движутся вместе с клубнями, что снижает качество сепарации [100].

На выделении примесей по размерному признаку основаны устройства просеивающего типа: конвейерные, грохотные, вальцовые, пайлерные, пружинные (спиральные), роторно-пальцевые и кулачковые [7, 43].

Основное их назначение, в зависимости от влажности почвы, это выделения мелких почвенных и растительных примесей, частичное разрушение комков и частичная очистка клубней от налипшей почвы [7, 29, 44].

По данным авторов У.А. Аси, В.М. Алакина, Н.И. Верещагина, Н.Н. Колчина, Г.Д. Петрова, Д.Н. Порошина, К.А. Пшеченкова, Н.В. Шабурова, Bostelmann С. и др. использование рабочих органов просеивающего типа весьма эффективно для послеуборочной доработки корнеклубнеплодов при наличии мелких почвенных примесей даже при повышенной влажности и тяжелых по механическому составу.

Многие исследователи, в том числе Я.И. Верменко, К.А. Пшеченков, Н.В. Шабуров и др. отмечают, что вращательное движение рабочих органов сепараторов (ротационные) способствует более активному рассредоточению клубней и более высокой эффективности просеивания почвенных примесей в сравнении с поступательным движением пруткового транспортера или возвратно-поступательным движением грохотов [6, 36, 97, 100, 102]. При этом одним из основных факторов, влияющих на выбор типа рабочей поверхности сепаратора, является максимально низкий уровень повреждений клубней, особенно свежесобраных [80]. С позиции минимизации повреждений клубней к наиболее пер-

спективным можно отнести сепараторы, состоящие из валов, вращающихся в одном направлении. На валах установлены рабочие органы (диски, пружины, пластины, их комбинации или подобные элементы) [6, 70, 71, 91, 100].

По данным авторов В.М. Алакина и Н.В. Шабурова [5, 99, 100, 101] подобные ротационные сепараторы, как правило, обладают высокой эффективностью минимальными потерями и повреждениями клубней, простотой конструкции, высокой износостойкостью и надежностью в работе при возможности быстрого изменения величины сепарирующих отверстий [92, 93, 102]. Особенно проявляется преимущество ротационных сепараторов при значительном содержании примесей и повышенной влажности обрабатываемого вороха. Так по данным [100, 101] при обработке сильно засоренного вороха (до 40 %) и влажности до 30 % на роторно-пальцевом сепараторе полнота выделения примесей составила 98 % при отсутствии забивания сепарирующих просветов и залипания рабочих органов.

Форма рабочих органов ротационных сепараторов во многом определяет интенсивность их взаимодействия с клубнями, транспортирующую способность и качество обработки вороха, а также целесообразность их применения с учетом почвенно-климатических и хозяйственных условий. Ротационные сепараторы могут оснащаться следующими рабочими органами: дисковые, пружинные, роторно-пальцевые, пайлерные и кулачковые.

Четкой общепринятой классификации рабочих органов ротационных сепараторов нет, поэтому в данной работе предлагается классифицировать ротационные сепараторы по форме рабочих органов, технологическому назначению, условиям взаимодействия с обрабатываемым продуктом и др. (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Классификация рабочих органов ротационных сепараторов

Рассмотрим наиболее распространенные в хозяйственных условиях ротационные сепарирующие устройства. К первой группе можно отнести широко известный сепаратор картофелесортировального пункта КСП – 15 В, КСП – Б и КСП – 25, образованный дисковыми рабочими органами.

К основным параметрам такого сепаратора относятся: D – диаметр дисков; C – зазор между ними; n – частота вращения; L – длина и B – ширина сепаратора. Большое значение на продвижение клубней по дискам сепаратора оказывают величины: зазор между дисками – C и диаметр дисков – D . Их значение определяют исходя из двух условий: первое – взаимодействие одиночного тела с дисками и второе – взаимодействие двух тел с дисками [29].

Дисковый сепаратор образован набором валов с дисками. Качество его работы в значительной степени определяется видом почвенных примесей и их влажностью. Сепаратор пригоден для выделения в основном мелких просеивающихся почвенных примесей. Эксплуатация дисковых сепараторов в хозяйственных условиях показала, что при наличии в ворохе растительных остатков и ботвы, наблюдается их наматывание на валы. В процессе работы резиновые обечайки истираются, соскакивают со ступиц и весьма недолговечны. При влажности почвенных примесей до 28 % они налипают на диски и сепарация резко ухудшается.

Кроме того, дисковые сепараторы работают в интенсивном режиме с числом оборотов до $12,6 \text{ с}^{-1}$, для частичного предотвращения налипания почвы и устойчивого перемещения клубней. Интенсивный режим значительно повышает скорость соударения между клубнями и рабочими органами, в результате увеличивается повреждаемость картофеля до 30 % по массе [7, 99].

К группе сепараторов с пружинными рабочими органами относятся сепараторы, используемые в оборудовании для послеуборочной доработки картофеля и корнеплодов зарубежных фирм Miedema, Grimme и ряда других. Подобные сепараторы принципиально выполнены по одной схеме с незначительными отличиями, например материал рабочих органов, способы очистки и т.п. В качестве типичного пружинного сепаратора рассмотрим сепаратор голландской фирмы Miedema BV. Его рабочая поверхность образована из блока спиральных металли-

ческих пружин, расположенных последовательно друг за другом и вращающихся в одном направлении (рисунок 1.2).

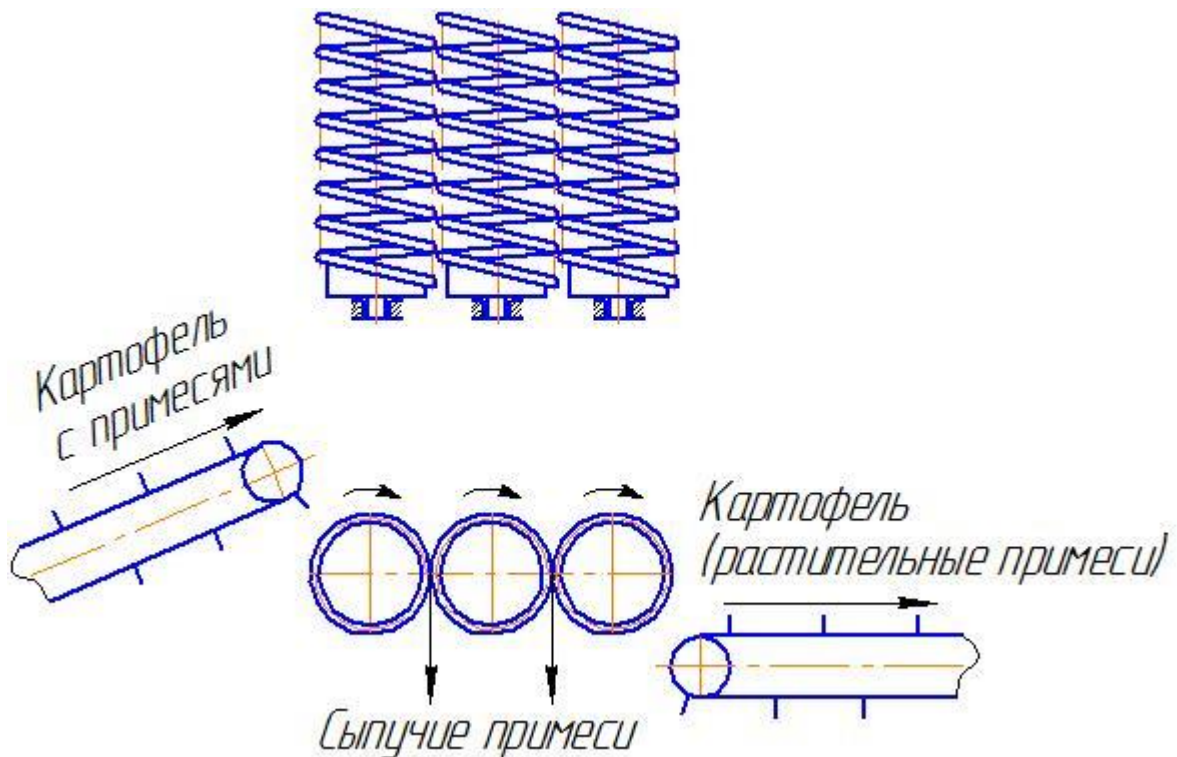


Рисунок 1.2 – Схема пружинного сепаратора

На работу пружинного сепаратора оказывают существенное влияние следующие основные факторы: частота вращения валов с пружинами, расстояние между соседними пружинами, естественная вибрация пружины, количество и влажность примесей в составе картофельного вороха; подача картофельного вороха. При обработке вороха повышенной влажности (до 30 %) с большим содержанием почвенных и растительных примесей (до 40 %) почва налипает на пружины и наматываются растительные остатки. В результате может происходить надлом пружин в месте крепления к валу в крайнем положении, что приводит к увеличению расстояния между соседними пружинами. В этом случае на участке сепарации с примесями выделяются клубни, увеличиваются повреждения вследствие защемления и выдавливания клубней. Качество сепарации примесей снижается и с картофелем при загрузке в насыпь идет значительное количество почвы с образованием почвенных столбов (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Качество работы пружинного сепаратора

Рабочая частота вращения пружин по данным [64, 82] составляет $4,8...19,7 \text{ с}^{-1}$, что можно отнести к интенсивному режиму. В результате повышает скорость соударения между клубнями и рабочими органами, что увеличивает вероятность повреждения клубней.

Сепараторы с пайлерными рабочими органами применяются как для послеуборочной доработки сильно засоренного картофеля и корнеплодов, так и в уборочной технике. Они обладают высокой эффективностью сепарации примесей и производят частичное разрушение почвенных комков и очистку картофеля и корнеплодов от налипшей почвы [60, 65].

В конструкции сепаратора почвенных примесей фирмы BILSMA HERKULES (Голландия) применены пайлерные рабочие органы (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4. – Сепаратор с пайлерными рабочими органами

Рабочие органы пайлерных сепараторов располагаются последовательно под некоторым углом для обеспечения транспортирующей способности. Функционируют такие сепараторы в основном с обеспечением режима безотрывного перемещения вороха при незначительном повреждении клубней [92, 93].

Сепараторы с кулачковыми рабочими органами применяют в основном в машинах для уборки корнеплодов. Сепаратор образован набором параллельных валов, вращающихся в одном направлении с установленными на них рабочими органами виде кулачков (битеров). Кулачки одного вала входят в зазоры соседнего для обеспечения самоочистки. Для обеспечения сепарации мелких почвенных примесей, разрушения почвенных комков и очистки корнеплодов от налипшей почвы необходим интенсивный режим работы с подбрасыванием вороха, что может приводить к значительным повреждениям [93]. В тоже время по данным Б.П. Шабельника [96, 97] рассредоточение вороха и сепарация примесей может происходить и при перевалочном перемещении корнеплодов в безударном рабочем режиме. Это снижает интенсивность силового взаимодействия корнеплодов с рабочими органами и повреждения не превышают 5 % [96, 97].

В НИПТИМЭСХ НЗ России был создан и испытан сепаратор на основе роторно-пальцевых рабочих органов [100, 101], состоящий из двух участков: для

выделения растительных примесей и ботвы; сепарации мелких почвенных примесей (рисунок 1.5).

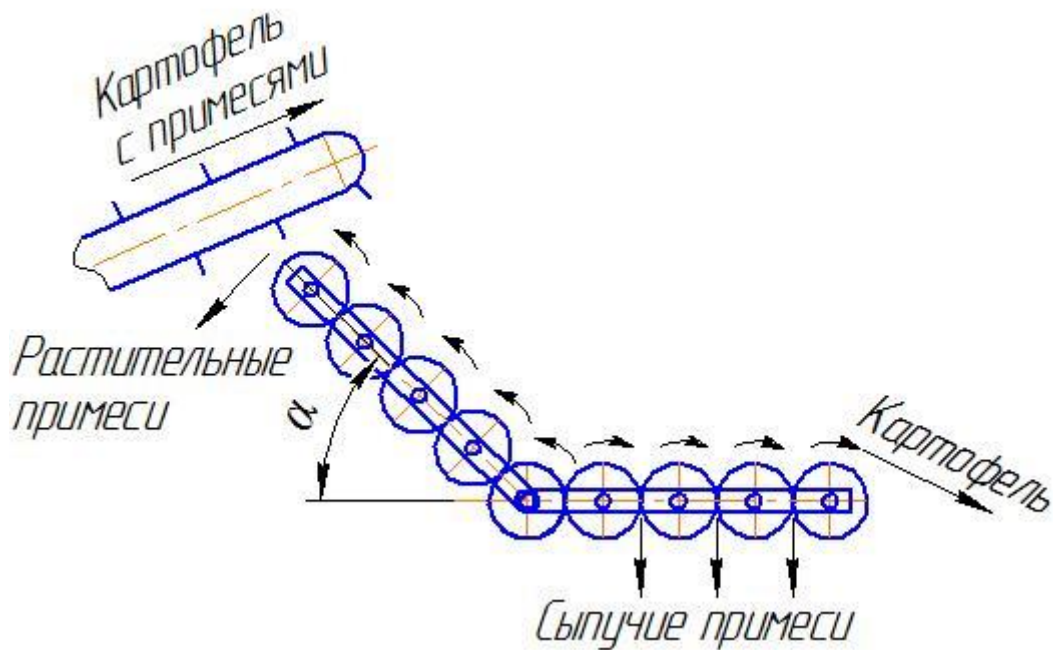


Рисунок 1.5 – Схема сепаратора

Рабочая поверхность сепаратора образована набором валов с установленными на них рабочими органами – дисками с выступающими пальцами с наклоном в сторону – роторами (рисунок 1.6).

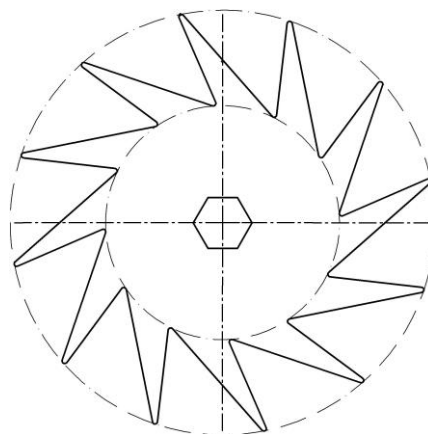


Рисунок 1.6 – Рабочий орган сепаратора

Пальцы имеют усеченную коническую форму вдоль и поперек сечения их профиля, что делает их эластичными и мягкоупругими. Исследования устройства показывают, что для эффективной сепарации примесей и исключения защемления компонентов вороха эластичные пальцы роторов должны иметь наклон против направления вращения. Соударения картофеля с рабочими элементами роторного сепаратора практически не приводят к повреждениям клубней за счет перехода части кинетической энергии клубня в потенциальную энергию деформации мягкоупругого пальца. Перемещение клубней по рабочей поверхности может происходить как в безотрывном режиме, так и с частичным отрывом [5, 39, 100]. Подобные режимы обеспечиваются при частоте вращения $6,5...8,4 \text{ с}^{-1}$.

Анализа ротационных сепараторов показывает, что качество сепарации примесей и повреждения клубней зависят от формы рабочих органов и кинематических параметров сепараторов. Следовательно, при дальнейшей разработке рабочих органов ротационных сепараторов следует учитывать конструктивные особенности и кинематические режимы наиболее перспективных рабочих органов. Частота вращения рабочих органов дискового сепаратора – $12,6 \text{ с}^{-1}$, пружинных рабочих органов – $4,8...15,7 \text{ с}^{-1}$, пайлерных и кулачковых – $9,4...12,6 \text{ с}^{-1}$, роторно-пальцевых рабочих органов до $6,5...8,4 \text{ с}^{-1}$.

По данным [5, 7] сепараторы на основе роторно-пальцевых рабочих органов показали высокую эффективность (до 95 %) и надежность функционирования при обработке влажного (до 35 %) и значительно засоренного (до 40 %) вороха картофеля и рекомендованы НТС Министерства сельского хозяйства Калужской области к применению в условиях семеноводческих, подсобных и фермерских хозяйств.

В результате анализа рабочих органов и конструкций сепараторов установлено следующее:

– сепараторы с вращающимися дисками, пружинами, пайлерами обеспечивают эффективную сепарацию примесей только при значительном кинематиче-

ском режиме рабочих органов в пределах $9...15,7 \text{ с}^{-1}$, что может приводить к повреждениям клубней в особенности свежееубранных;

– определены технологические предпосылки к повышению эффективности функционирования сепараторов на основе роторно-пальцевых рабочих органов путем совершенствования их конструкции;

– существует возможность разработки и совершенствования конструкции рабочих органов на основе роторно-пальцевых для создания универсального рабочего органа для сепарации примесей и сортирования клубней.

1.2. Анализ способов и устройств для сортирования картофеля

Ворох картофеля, поступающий на сортирующие устройства, представляет собой смесь клубней различных фракций. Задача сортирования заключается в разделении клубней по размерно-массовым характеристикам на фракции согласно предъявляемым требованиям к обрабатываемой продукции.

При загрузке на хранение в осенний период полное разделение на фракции обычно не предусматривают, снижая тем самым повреждения свежееубранных клубней. Например, при закладке продовольственного картофеля на хранение осенью из всей массы картофеля выделяют примеси и мелкие нетоварные клубни массой до 25 г. Такая подработка вороха обеспечивает скважность насыпи и хорошую вентиляцию в процессе хранения. В период хранения или после производят сортирование клубней на фракции [62, 90]. Для качественной подготовки посадочного материала необходимо обеспечить максимально точное выделение семенной фракции. Это позволяет повысить качество работы посадочных машин, обеспечить равномерность всходов и созревание клубней, а также обеспечить лучшие условия для дальнейших технологических процессов [88, 90].

Процесс сортирования картофеля различными механическими устройствами характеризуется следующими основными показателями: точность разделения клубней на фракции, удельная производительность и степень повреждения обрабатываемого материала [19, 29].

На эффективность процесса сортирования картофеля в значительной степени влияют размерно-массовые характеристики клубней, условия работы и особенности конструкции рабочих органов и сортирующих устройств в целом [15]. На известных отечественных и зарубежных сортировках разделение клубней на фракции производится по размерному признаку на рабочих органах с различными формами калибрующих отверстий.

Исследованиями влияния размерно-массовых характеристик клубней на процесс сортирования в нашей стране занимались И.Н. Бацанов, В.П. Горячкин, Е.А. Глухих, Н.Н. Колчин, Ю.И. Кириенко, А.М. Куклев, К.А. Пшеченков, А.А. Сорокин, Н.В. Шабуров, Б.М. Юн и другие.

Было установлено, что для процесса сортирования на механических устройствах, клубень картофеля необходимо характеризовать несколькими линейными размерами: длиной – l , шириной – b , толщиной – c и S – размером, который определяется по зависимости

$$S = 0,708\sqrt{b^2 + c^2}, \quad (1.1)$$

С учетом этих параметров приближённо клубень можно представить как эллипсоид (рисунок 1.7), где l , b , c — полуоси эллипсоида.

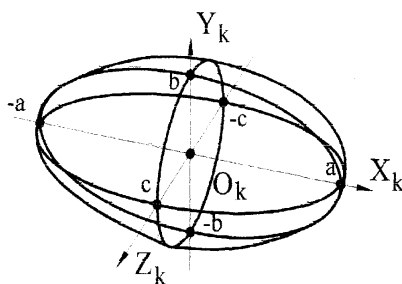


Рисунок 1.7 – Приближённая форма клубня

Так как сортирование клубней в механических устройствах происходит по размерному признаку, то при разработке рабочих органов и конструкций сортировок необходимо учитывать зависимость массы клубня от размеров: длины – l , ширины – b и толщины – c . Эти статистические величины находятся в тесной корреляционной зависимости между собой. [19, 29, 98] и показывают, что масса

клубня и каждый из его размеров, варьируются около определенного среднего значения. Это позволяет определить массовые границы каждой фракции и сортировать картофель по размерному признаку [19, 29, 98].

При рассмотрении процесса сортирования и определении приоритетного размера для разделения клубней, некоторые авторы утверждают, что длина и ширина клубня более достоверно отражают его массовые значения в сравнении с толщиной. Н.Н. Колчин утверждает [29], что как признак для сортирования, клубней картофеля, ни один из его размеров не имеет существенных преимуществ перед другими.

Рассматривая зависимость средней массы клубня m_k от значений его толщины, ширины и длины (рисунок 1,8), приведенные в [19, 29], видно, что кривые зависимостей имеют разную крутизну восхождения.

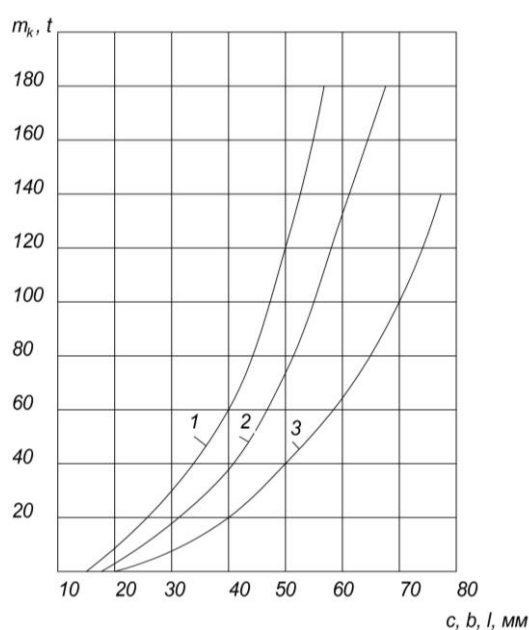


Рисунок 1.8 – Зависимость среднего значения массы m_k клубня картофеля от его размеров: 1 – толщины c ; 2 – ширины b ; 3 – длины l .

Анализируя приведенные зависимости можно отметить, что изменение толщины клубня отражается на изменении значения массы в больших пределах в сравнении с шириной и длиной клубня, то есть является более чувствительным параметром к соотношению масса – размер. Сортирование по толщине реализует-

ся в щелевые калибрующие отверстия, которые позволяют направленно 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 и иметь меньшие пределы регулировок калибрующих отверстий, а также размеры. Это позволит сортировать клубни различных фракций в щелевые отверстия при минимальном изменении размеров отверстий и реализовать возможность активного ориентирования сортируемой продукции. В результате может быть повышена производительность, уменьшены габариты сортирующего устройства, его материалоемкость и упрощены регулировки. Учитывая данное обстоятельство, можно принять в качестве приоритетного размера для деления клубней – толщину s .

Размерные признаки клубней определяют геометрическую форму калибрующих отверстий и тип рабочих органов сортировок.

Практическую реализацию в механических сортировках нашли следующие размерные признаки клубня – ширина, толщина и S – размер, что отражено в конструкции рабочих поверхностей в виде решет, сеток, продольных ремней, роликов различной конфигурации и др. Каждому типу рабочей поверхности соответствует определенная форма и размеры калибрующих отверстий: для деления клубней по толщине – продолговатые и щелеобразные; по ширине – круглые, по S – размеру – квадратные в том числе с регулируемым размером ячейки и т.д. Длина клубня как признак для деления практически не используется.

Важным показателем, характеризующим качество работы сортирующих устройств, при послеуборочной доработке картофеля является точность деления клубней. При делении клубней по размерным признакам качество работы сортирующей поверхности определяется теоретически возможной точностью сортирования, которая зависит от сорта картофеля, размерного признака для деления, фракционного состава, а также конструктивных особенностей рабочих органов. Теоретически возможную точность сортирования конкретного сорта картофеля по принятому размерному признаку можно определить по размерно-

массовым вариационным диаграммам или корреляционным таблицам, составленным для этого сорта при данной урожайности [29, 30, 35].

Отдельные участки сортирующей поверхности характеризуются действительным коэффициентом точности сортирования по каждой фракции в (%), который определяется

$$T = 100m_i / m_{\phi_i}, \quad (1.2)$$

где m_i – масса клубней, оказавшихся в данной фракции и отвечающим ее требованиям;

m_{ϕ_i} – общая масса клубней, выделенных в каждую фракцию.

Для большинства механических устройств сортирующих по размерному признаку, как правило, теоретический коэффициент точности сортирования выше, чем действительный [35]. Это связано с тем, что для некоторой части клубней не обеспечивается необходимая ориентация над калибрующими отверстиями в процессе движения по сортирующей поверхности, а также неравномерной порционной подачей клубней на рабочую поверхность и др. Порционная подача является причиной неравномерной загрузки сортирующей поверхности по времени и количеству клубней. Одной из причин является использованием лопастных загрузочных конвейеров, осуществляющих дозированную подачу клубней, а также возможность зависания, сгуживания и обрушения клубней при подаче непосредственно из приемного бункера.

Осуществить равномерную подачу картофеля на участок сортирования возможно при непосредственном переходе клубней с сепарирующей поверхности на сортирующую. Это может обеспечить комбинированная рабочая поверхность, состоящая из последовательно расположенных сепарирующего и сортирующего участков, выполненных в одном устройстве. Комбинированная поверхность, состоящая из сепарирующего и сортирующего участков, может состоять из рабочих органов различной конструкции либо одинаковой. При этом параметры и режимы функционирования комбинированной поверхности должны быть согласованы для обеспечения равномерного перехода клубней, исключения сгуживания и защем-

ления клубней [7, 9, 30, 52]. Учитывая это обстоятельство, использование в конструкции комбинированной поверхности одинаковых по конструкции рабочих органов для сепарации примесей и сортирования клубней может являться более перспективным направлением.

Комбинирование рабочих поверхностей широко применяют и ведущие иностранные фирмы – английские Downs, Vare – Grabers, Herbert, голландская – Miedema BV, немецкая – Grimme и др.

Следующим немаловажным показателем работы сортирующих устройств является производительность. Повысить ее возможно за счет увеличения подачи, ширины и длины рабочей поверхности или путем увеличения площади живого сечения калибрующих отверстий. При значительном увеличении подачи клубни могут перемещаться по сортирующей поверхности более чем в один слой. При этом многие калибрующие отверстия могут быть перекрыты и вероятность прохождения через них клубней верхнего слоя снижается. Это сокращает число клубней контактирующих с калибрующими отверстиями сортирующей поверхности и как следствие снижается точность разделения клубней.

Производительность сортирующего устройства напрямую зависит от типа и конструкции рабочих органов. По данным [29] использование в конструкции сортирующих устройств рабочих органов активного действия, например ротационных, повышает производительность по сравнению с другими типами рабочих органов таблица 1.1.

Большие значения, в данном случае для роликовой поверхности, объясняются более активным действием роликов на проход клубней в калибрующие отверстия. Поэтому сортирующие поверхности активного действия, образованные вращающимися рабочими органами – ротационные, обладают большей интенсивностью сортирования по сравнению с другими [21, 29].

Таблица 1.1 – Сравнительный анализ производительности ременной и роликовой сортирующих поверхностей

Способ выделения	Параллельный		Последовательный	
Номер участка	2	3	2	3
Усредненные значения производительности в $кг/с \cdot м$, для сортирующих поверхностей				
Ременной	4,06 – 5,54	6,54 – 9,16	5,95 – 7,85	3,95 – 5,49
Роликовой	10,7 – 12,3	14,7 – 18,6	1,06 – 14,5	11,1 – 11,6

Повышению производительности может способствовать также интенсивное рассредоточение клубней и уменьшение времени пребывания клубня над калибрующим отверстием, то есть время, в течение которого произойдет сравнение размеров калибрующего отверстия с размером клубня, по которому происходит сортирование. Для обеспечения этого условия необходимо, чтобы клубень был ориентирован соответствующим размером (ширина, толщина, S – размер) над калибрующим отверстием. Ориентирование клубня может быть реализовано по двум основным вариантам. Первый характеризуется интенсивным перемещением клубней с отрывом от рабочей поверхности и носит вероятностный характер. Второй – путем направленного ориентирования клубней рабочими органами или специальными механизмами при минимальном относительном перемещении клубней [81]. Это позволяет увеличить производительность сортирующих устройств и уменьшить повреждения картофеля при сортировании за счет сокращения времени взаимодействия клубней с рабочими органами до прохождения их в калибрующие отверстия.

Следовательно, чем больше клубней получают направленное ориентирование за более короткий промежуток времени и пройдут в калибрующие отверстия или перейдут на следующий участок, тем выше будет производительность сортирующей поверхности. Поэтому, применение в сортирующих устройствах механизмов для направленного ориентирования клубней, а также рабочих органов, конструкция которых способствует ориентированию клубней, может повысить производи-

тельность и является перспективным направлением развития конструкций сортирующих устройств.

Особое внимание при сортировании картофеля обращают на снижение уровня механических повреждений клубней, особенно свежесобранных. Возникновение повреждений тесно связано с количеством механизмов, задействованных в цикле послеуборочной доработки картофеля, технологических переходов и уровня перепадов между механизмами. Увеличению повреждений клубней способствуют также значительные относительные скорости и соударения клубней и элементов сортирующей поверхности обусловленных режимом функционирования.

Для снижения контактных повреждений клубней при взаимодействии с рабочими органами сортировок и между собой, способствует уменьшение количества механизмов и перепадов между ними, увеличение радиуса кривизны рабочих органов, применение защитных покрытий из полимерных материалов, резины специальных марок, а также разработка рабочих органов новых форм [29, 30, 45]. С этой позиции комбинирование сепарирующих и сортирующих рабочих поверхностей в одном устройстве исключает дополнительные механизмы и обеспечивает непосредственный переход клубней с участка на участок, а также разработка новых форм рабочих органов является перспективным направлением.

Рассмотрим с обозначенных выше позиций основные рабочие органы и устройства, применяемые для сортирования картофеля.

Сортирование клубней по толщине реализовано в конструкции сортирующего устройства с ременной рабочей поверхностью с калибрующими отверстиями щелевой продолговатой формы (рисунок 1.9) [29, 35].

Бесконечные круглые ремни сортирующего устройства образуют веерообразную поверхность с нарастающим размером щелевого зазора. С целью изменения границ разделения картофеля и других корнеплодов одновременно на несколько фракций предусмотрено бесступенчатое изменение калибрующего зазора в широких пределах между расходящимися ремнями круглого сечения. Благодаря

этому возможно универсальное применение устройства для сортирования клубней и корнеплодов разных форм и размеров.

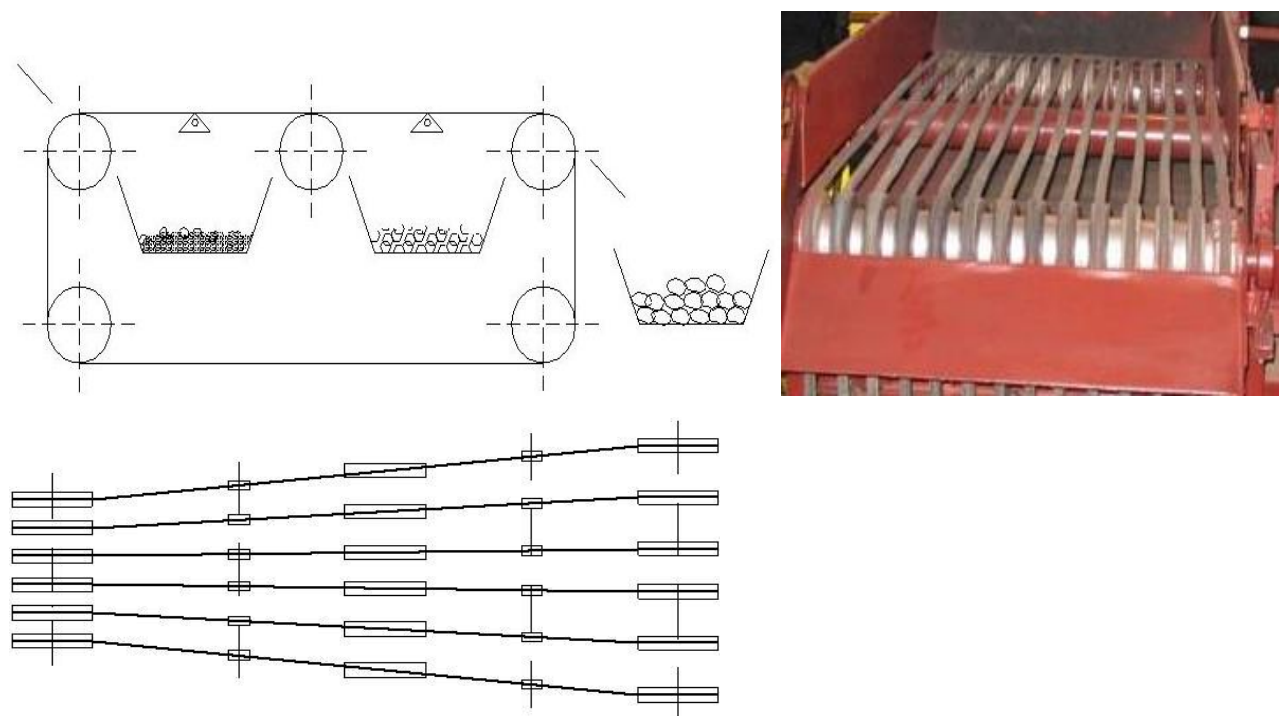


Рисунок 1.9 – Сортирующее устройство с ременной рабочей поверхностью

Исследования, проведенные Колчиным Н.Н. и Поповым А.А., показали, что при сортировании клубней в щелевые отверстия на ременной сортировке можно получить высокие показатели точности разделения на фракции до 90 % [35]. Для интенсификации процесса сортирования ремни совершают периодические колебания в вертикальной плоскости посредством механических встряхивателей специальной конструкции. В результате колебательных движений ремней клубни приобретают большую подвижность, что увеличивает количество случаев сравнения размера калибрующего отверстия и размера клубня, по которому происходит сортирование и как следствие вероятность прохождения клубня в калибрующее отверстие.

Ременная поверхность обладает высокой технологичностью и практически не повреждает обрабатываемый материал, так как переносная скорость сортируемой массы и рабочей поверхности одинакова, и силовое воздействие последней на клубни ослаблено. Конструкция ременной поверхности обеспечивает также непо-

средственный переход клубней с одного участка сортирования на другой. В результате экспериментальных исследований [34] было установлено, что точность разделения картофеля на ременной сортировке в значительной степени зависит от сохранения установленного размера щелевых отверстий. В процессе работы устройства при взаимодействии клубней с ременной сортирующей поверхностью может происходить изменение размера калибрующей щели между ремнями, что отрицательно сказывается на точности сортирования. Совместное перемещение клубней и ремней исключает возможность дополнительной очистки клубней от почвы.

Производительность ременной поверхности напрямую связана с точностью сортирования. Для обеспечения точности сортирования клубни должны располагаться на ремнях в один слой, так как относительное перемещение клубней сведено к минимуму и обеспечивается в основном встряхивателями. Это ограничивает возможность повышения производительности сортирующей поверхности.

Для сортирования клубней по ширине применяют роликовые рабочие органы (рисунок 1.10), образующие калибрующие отверстия преимущественно округлой формы [29, 41].

Роликовые сортировки состоят из батарей роликовых валов. К их основным параметрам относятся: диаметр роликов – D_p ; зазор между ними – c ; частота вращения – n ; длина сортирующего участка – l_c ; ширина сортирующего участка – B .

Роликовые рабочие органы получили реализацию как в отечественном оборудовании, например КСП – 15 Б, КСП – 15 В, КСП – 25 так и в оборудовании зарубежных фирм голландской – Miedema BV, немецкой – Grimme и др.

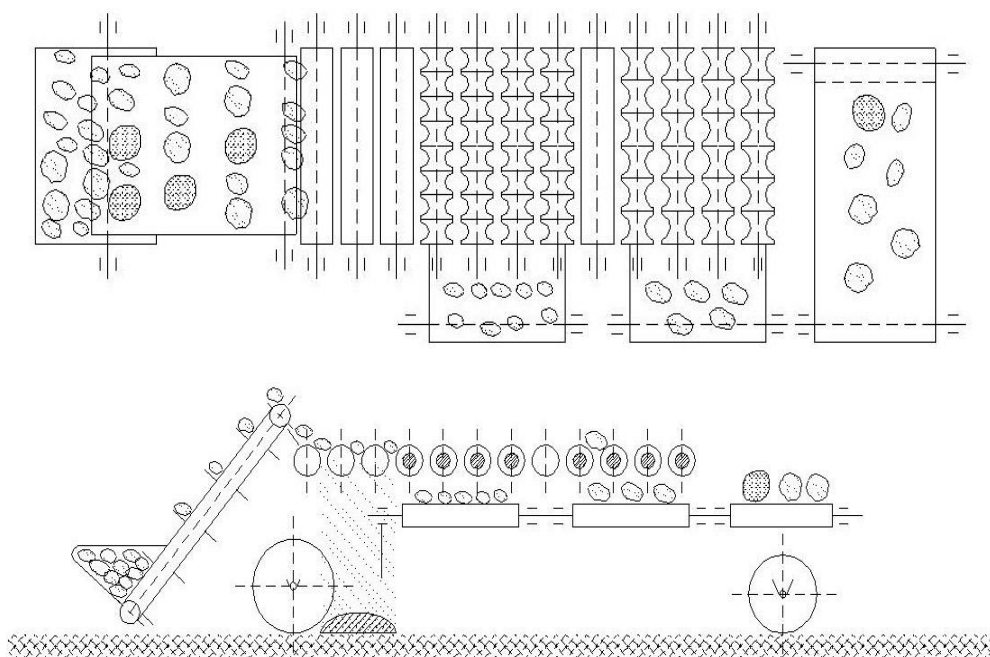


Рисунок 1.10 – Сортирующее устройство с роликовой рабочей поверхностью

В данном оборудовании используется принцип комбинирования сепарирующих и сортирующих поверхностей. Используемые в комбинированных поверхностях дисковые, пружинные и др. рабочие органы обеспечивают интенсивное рассредоточение вороха, выделение примесей и равномерную подачу клубней на сортирующую поверхность без дополнительных механизмов

Регулировка калибрующих отверстий роликовых сортировок осуществляется путем увеличения расстояния между соседними роликовыми валами. При этом может изменяться форма калибрующего отверстия от округлой до овальной, что негативно сказывается на точности сортирования, особенно клубней удлиненной формы, и приводит к их повреждениям до 15 %.

К недостаткам роликовой сортирующей поверхности также можно отнести: значительные повреждения клубней связанные с интенсивным режимом вращения роликов до 21 с^{-1} и защемление клубней. При обработке картофельного вороха повышенной влажности и значительным содержанием примесей происходит залипания почвой поверхности роликов, изменение размеров калибрующих отверстий, что снижает точность сортирования [29, 98].

Для сортирования по S – размеру используются сетчатые рабочие органы. Они образованы бесконечным сетчатым полотном с квадратными отверстиями, имеющими фиксированный размер калибрующих ячеек (рисунок 1.11).

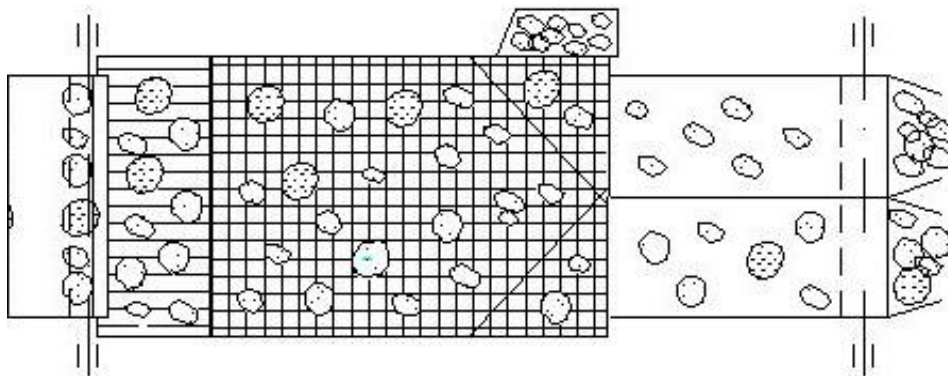


Рисунок 1.11 – Сортировка с сетчатой рабочей поверхностью

Для интенсификации процесса сортирования используют встряхиватели с изменяемой амплитудой и частотой колебаний. На одной сетчатой поверхности клубни разделяются на две фракции, для выделения других фракций необходимо заменить полотно. С переходом на другие сорта картофеля изменяют и скорость движения полотна в пределах $0,1...0,5 \text{ м/с}$, а также частоту и амплитуду встряхивания. Производительность сетчатых поверхностей ограничена необходимостью подачи клубней в один слой, так как клубни и сетка движутся совместно и ограничено их взаимное перемещение – только при встряхивании. Необходимость замены сетчатого полотна при переходе на другие сорта или изменение границ фракций увеличивает материалоемкость сортировок и время, затрачиваемое на перенастройку [29].

Сортирование по S – размеру на сетчатом полотне подразумевает взаимодействие клубня сразу с четырьмя гранями калибрующего отверстия, в отличие от сортирования по толщине, где достаточно двух граней. Следовательно, при встряхивании сетчатого полотна и прохождении клубня в калибрующее отверстие необходимо его точное расположение над отверстием, что ограничивает производительность и увеличивается вероятность повреждения клубней, виде обдиров. Возможно также заклинивание клубня в калибрующем отверстии и вследствие

травмирование и перемещение на другой участок, что снижает точность сортирования.

Разделение клубней по S – размеру реализовано также в сортировках грохотного типа. Рабочая поверхность образована металлическими решетками с квадратными отверстиями. Наибольшее распространение получили сортировки с параллельным (ярусным) расположением решет (рисунок 1.12), на которых осуществляется параллельное выделение фракций.

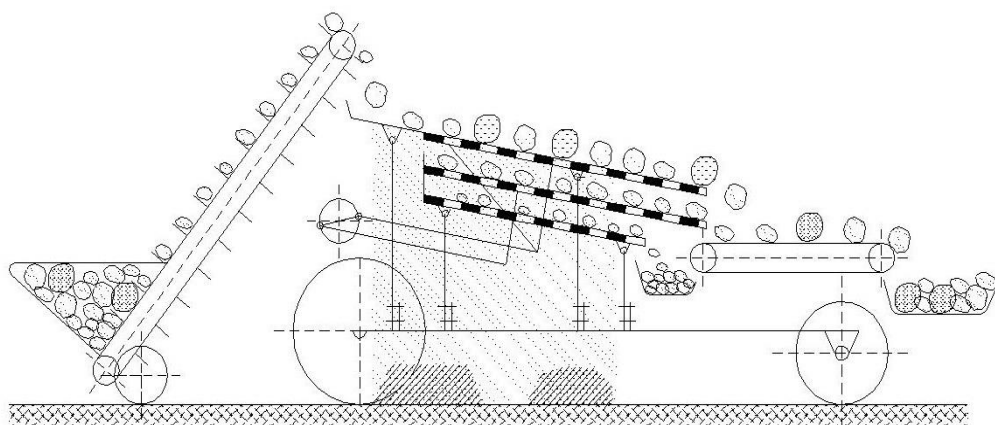


Рисунок 1.12 – Сортировка грохотного типа

Подобные сортировки используются, в том числе, и за рубежом для сортировки картофеля и лука. Колеблющиеся решета установлены с наклоном вниз или горизонтально, для обеспечения кинематических параметров. Колебания решет происходит с помощью кулачкового встряхивателя.

Сортировки работают на режимах, при которых сортируемый продукция перемещается по решетам без отрыва от поверхности с чередованием скольжения и остановок [43, 85].

При сортировании картофеля эти параметры принимают в следующих пределах: угол наклона решета $\alpha = \beta = 6 \div 10^\circ$; амплитуда встряхивания $A = 25 \dots 30 \text{ мм}$; частота вращения эксцентрикового вала $23 \dots 26 \text{ с}^{-1}$ [43]. Грохотные сортировки обеспечивают точность сортирования в пределах 70...95 %.

Производительность сортировок ограничена необходимостью нахождения и перемещения клубней по решетку в один слой.

Повреждения клубней на грохотных сортировках зависят от уровня силового воздействия, который определяется режимом движения решет с одной стороны и производительностью с другой.

При обработке влажного и засоренного почвенными и растительными примесями вороха, наблюдается налипание почвы на калибрующие отверстия и заивание примесей на решетках. В результате изменяется размер калибрующих отверстий, что снижает точность сортирования и снижение производительности в результате частичного перекрытия отверстий растительными примесями.

Анализируя рассмотренные выше технологические процессы сортирующих устройств, можно заключить, что практически во всех случаях разделение на фракции основано на вероятностных процессах. По данным [23, 44, 51, 54] интенсивность процесса сортирования можно повысить за счет направленного ориентирования клубней относительно калибрующих отверстий. При этом конструкция рабочих органов и режимы работы сортировок определяют процесс ориентирования и время нахождения клубней на сортирующей поверхности.

Повысить точность и сократить время сортирования возможно при более быстром совпадении расположения размера клубня, по которому происходит сортирование с плоскостью калибрующего отверстия [81].

Один из вариантов направленного ориентирования клубней в щелевой зазор реализован на дисково-ленточном сортирующем устройстве конструкции НИПТИМЭСХ НЗ. Направленное ориентирование клубней в щелевой зазор обеспечивается путем их разворота на дисках разного диаметра. С целью сокращения времени разворота и ориентации клубней в отверстия диски выполнены разного диаметра [51].

Другой вариант придания клубням направленного ориентирования был реализован в конструкции ременной сортирующей поверхности, где разделение происходит по признаку – толщина. Для этого ременная поверхность дополнительно оборудована ориентирующими дисками, установленными между ремнями. В ре-

зультате чего обеспечивается направленное ориентирование клубней и корнеплодов в щелевые калибровочные отверстия.

Ориентирующие диски способствуют развороту клубней длинной осью вдоль щелей, образованных ремнями. В результате сокращается время перемещения клубня в калибровочное отверстие до 0,45 с [29, 35]. По данным [29, 35, 43] скорости движения ремней и ориентирующих дисков равны 0,7...0,8 м/с и 0,84...1,2 м/с соответственно при высоте их установки над ременной поверхностью 10...15 мм. В результате длина зоны сортирования после ориентирующих дисков сокращается и составляет 3000...350 мм.

При сортировании корнеплодов и клубней удлиненных форм обеспечению лучшей ориентации способствуют разные скорости соседних ремней ременной сортирующей поверхности (различие 0,1...0,2 м/с). При этом происходит их поворот и ориентация вдоль щелевых калибрующих отверстий.

Как видно из приведенного обзора механические сортирующие устройства, основанные на признаке разделения – толщина имеют больший потенциал в реализации принципа активного ориентирования сортируемой продукции в сравнении с сортировками, основанными на других признаках разделения.

Результатом направленного ориентирования и ускорения взаимодействия клубней с калибрующими отверстиями является уменьшение времени сравнения размера клубня и калибрующего отверстия. Следовательно, за одно и тоже время можно увеличить количество клубней взаимодействующих с данными калибрующими отверстиями, что будет способствовать повышению производительности сортирующего устройства в целом.

Исследованиями Алакина В.М., Верменка Я.И., Сафразбекяна О.А., Шабурова Н.В. и других ученых установлено, что ротационные рабочие органы обладают высокой транспортирующей способностью при щадящем режиме взаимодействия с клубнями с возможностью сортирования.

По данным [5, 7] сортировки с ротационными рабочими органами на основе роторно-пальцевых способны осуществлять процесс сепарации примесей и сортирования клубней на одной рабочей поверхности универсальными рабочими ор-

ганами. Разделение клубней происходит по толщине в калибрующие отверстия щелевой формы.

Для реализации данного процесса была предложена экспериментальная конструкция рабочих органов с образованием калибрующих отверстий щелевой формы. Частота вращения была принята на уровне $4,7...5,2 \text{ с}^{-1}$.

Разработка была реализована и испытана на уровне опытного образца в условиях Калужской области. По данным [5, 7] данные режимы вращения $4,7...5,2 \text{ с}^{-1}$ обеспечивают производительность при сортировании в среднем $15...18 \text{ т/ч}$ на уровне роликовых и сетчатых сортировок. При этом наблюдалась недостаточная точность сортирования картофеля, которая составляла в среднем 75 %, особенно на сортах с удлинённо-овальной и длинно-овальной формой. что связано с недостаточной эффективностью ориентирования клубней вдоль щелевых отверстий. Уровень повреждения клубней находился в пределах 3...5 %, эффективность сепарации примесей до 95 %. По данным [15] около 80 % внесенных в Госреестр сортов картофеля имеют удлинённо-овальную и длинно-овальную формы клубней.

Поэтому разработка и совершенствование сортировок на основе универсальных роторно-пальцевых рабочих органов, способных выделять примеси и сортировать клубни является перспективным направлением. При этом необходимо выдержать щадящий кинематический режим рабочих органов и изыскать новые конструктивные решения по реализации процесса активного ориентирования клубней, в том числе за счет сочетания вращательного и вибрационного движения рабочих органов.

1.3. Влияние вибрации на интенсификацию технологических процессов

В технике, особенно в машиностроении, широко применяется вибрация. Наличие вибрационного воздействия приводит во многих случаях к тому, что различные технологические процессы с механическим действием происходят иначе, чем в обычных условиях. В [17] рассмотрены основные. К ним можно отнести:

- перемещение тел или сыпучей среды по вибрирующим поверхностям, широко используется в вибрационных транспортирующих и транспортно-технологических машинах и устройствах;
- снижение под действием вибраций эффективных элементов технологических процессов (кажущихся), а иногда и улучшение истинных (физических) явлений на примере снижения коэффициента сухого трения между взаимодействующими телами. В результате чего резко уменьшается сопротивление тел относительному смещению, вызываемому постоянными или медленно меняющимися силами взаимодействия;
- расслоение частиц сыпучих материалов по удельному весу и крупности под действием вибрации. Это явление обусловлено действием силы тяжести в условиях снижения эффективных коэффициентов трения при вибрации;
- разделение частиц сыпучего материала на вибрирующих поверхностях по плотности при снижении коэффициента внутреннего трения, форме и некоторым другим параметрам (вибросепарация).

В ряде случаев технологические процессы могут быть реализованы только благодаря использованию вибрации, в других вариантах – применение вибрации приводит к значительной интенсификации процессов и повышению качественных показателей [17, 72,].

Подготовка зернового материала для хранения и дальнейшего использования связана с необходимостью очистить его от примесей и разделить по сортам.

Наибольшее распространение в зерноочистительных машинах получили плоские качающиеся решета [41, 43]. Они имеют отверстия различной формы и установлены под углом $7-8^{\circ}$. В качестве признаков разделения семян служит толщина и ширина. Под действием сил, возникающих при колебательном движении зерновой материал равномерно распределяется и перемещается к открытому — сходящему концу, разделяясь на две фракции: проход (частицы, прошедшие через отверстия сита) и сход (частицы, не прошедшие через сито).

При этом многократные перемещения зерен по поверхности решета вследствие колебательного движения повышают вероятность просеивания мелкой фракции. Если форма частиц удлиненная, то более эффективными могут быть прямолинейные колебания, обеспечивающие определенную ориентацию частиц относительно отверстия.

Прямолинейные гармонические колебания без подбрасывания с двусторонним движением и мгновенными остановками, применяемые обычно для разделения смесей по ширине или толщине частиц. Непрерывный контакт с поверхностью и отсутствие интервалов относительного покоя увеличивает вероятность просеивания частиц из нижнего слоя и уменьшает динамические нагрузки.

При работе корнеклубнеуборочных машин на тяжелых и каменистых почвах используются подкапывающие рабочие органы вибрационного типа. Вибрирующий лемех подкапывает рядки картофеля и передает далее на сепарирующие рабочие органы. Вибрационные лемеха обеспечивают хорошую передачу пласта, меньше забиваются почвой и растительными остатками, имеют меньшее тяговое сопротивление.

Используемые в свеклокопателе КВС – 6 вибрационные копачи снижают (20...25 %) поступления комьев почвы на шнековые очистители копателя [66]. Благодаря вибрации копачей происходит разрушение почвенных комьев, снижается коэффициент внутреннего трения за счет уменьшения связности почвы и сил сцепления, действующих между частицами почвы.

В рассмотренных устройствах вибрационное воздействие рабочего органа на обрабатываемый материал способствует:

- равномерному распределению его по рабочей поверхности;
- транспортированию его вдоль рабочего канала для непрерывности технологического;
- самосортированию – погружение в нижние слои (к поверхности решета) частиц меньших размеров и большей плотности и всплывание в верхние слои, частиц больших размеров и меньшей плотности;
- просеиванию – прохождение через калибрующие отверстия тел с размерами меньшими, чем размеры отверстия.
- раздельного вывода фракций из рабочего пространства;
- разрушению почвенных комьев и снижению коэффициента внутреннего трения за счет уменьшения связности почвы и сил сцепления,
- интенсификации и повышению качественных показателей процесса калибрования путем направленного ориентирования тел, относительно калибрующих отверстий.

Выводы:

В результате проведенного анализа конструкций и процессов сортирующих и сепарирующих устройств установлено следующее:

- комбинирование сепарирующих и сортирующих поверхностей обеспечивает непосредственный межоперационный переход обрабатываемой продукции и способствует снижению уровня механических повреждений и количеству единиц технологического оборудования;
- сортирующие устройства ротационного типа способны осуществлять сепарацию примесей и обеспечить высокую производительность при интенсивном режиме рабочих органов в пределах $9...15,7\text{с}^{-1}$, что увеличивает вероятность повреждения клубней, за исключением роторно-пальцевых;
- совершенствование конструкции рабочих органов активного действия на основе роторно-пальцевых способствует обеспечению щадящего режима обработки клубней высокой технологической надежности и снижению повреждений клубней, в том числе свежееубранных;

– обеспечение направленного ориентирования клубней способствует повышению точности сортирования и производительности устройств и реализуемо в устройствах с продольными или щелевыми калибрующими отверстиями;

– повысить производительность и точность сортирования клубней рабочими органами на основе роторно-пальцевых можно за счет ориентирования клубней относительно щелевых калибрующих отверстий путем сочетания вращательного и вибрационного действия рабочих органов (вибророторов);

- в результате аналитического обзора сортирующих устройств предложена гипотеза о создании виброротационной сортирующей поверхности, с универсальными рабочими органами для сепарации примесей и сортирования клубней.

Рабочей гипотезой является предположение о возможности совмещения вращательного и вибрационного воздействия вибророторов в процессе сортирования картофеля с целью повышения производительности и точности сортирования.

2. Теоретическое обоснование конструктивных параметров и режимов работы виброротационной сортировки

2.1. Определение основных параметров конструкции универсального виброротора для сепарации примесей и сортирования клубней

В результате анализа и предложенной классификации рабочих органов ротационных сепараторов, а также ротационных рабочих органов сортирующих поверхностей, определены достоинства этих устройств. Они заключаются в высокой транспортирующей способности, в простоте конструкции и регулировок, например роликовые поверхности, технологической эффективности и надежности и возможности активного ориентирования. Но при этом были выявлены и присущие им некоторые недостатки, например, для роторно-пальцевых – несоответствующая агротехническим требованиям точность сортирования картофеля.

Исходные параметры геометрической формы роторно-пальцевых рабочих органов сепарирующих и сортирующих устройств были разработаны Н.В. Шабуровым и В.М. Алакиным [7, 101].

В результате анализа существующих конструкций сепарирующих и сортирующих рабочих органов и изысканий направленных, на разработку универсального рабочего органа, обеспечивающего надежность технологического процесса в тяжелых почвенно-климатических условиях, была предложена для дальнейшей разработки и совершенствования сортирующих рабочих органов, конструкция виброротора с пальцеобразными выступами сферической усеченной формой (рисунки 2.1). Пальцеобразные выступы предлагается разместить с наклоном против направления вращения виброротора для устранения захвата и защемления компонентов вороха и наматывания растительности на валы [7, 66].

Отношение наружного диаметра виброротора к диаметру окружности впадин пальцеобразных выступов принимаем равное 2:1, что позволяет для любого

наружного диаметра виброротора получить необходимое количество выступов с одинаковой кривизной их поверхности [7, 66].

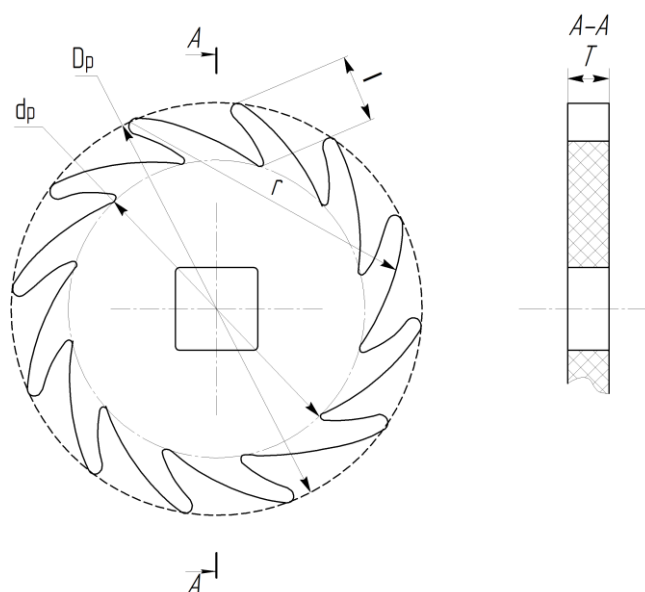


Рисунок 2.1 – Универсальный виброротор

Примем условно размер клубня, по его среднему диаметру $d = 0,05 \text{ м}$, тогда по данным [29] наружный диаметр виброротора должен составлять $D = 0,2 \text{ м}$. Количество выступов будет равно двенадцати на основании графического построения при пропорциональном вычерчивании проекций пальцеобразных выступов радиусом виброротора центр, которого размещен в вершине четвертого пальца по очередности [7].

Упругие свойства конструкции и частичные радиальные колебания вершин усеченных резиновых пальцеобразных выступов должны обеспечить самоочистку вибророторов от налипания почвы и снизить повреждения клубней. Значения параметров виброротора в результате исследований приняты как исходные дальнейшей разработки и создания универсальных сортирующих поверхностей.

В качестве основных параметров виброротора, принятых к исследованиям и дальнейшей разработке, относятся следующие: наружный диаметр, описывающий вершины пальцеобразных выступов – $D_p = 0,2 \text{ м}$, диаметр, вписанный в основание выступов – $d_p = 0,14 \text{ м}$, толщина виброротора – $T = 0,02 \text{ м}$, количество пальце-

образных выступов – $n = 12 \text{ шт}$, длина выступа – $l = 0,03 \text{ м}$, толщина выступа в основании и в вершине.

Геометрические параметры вибророторов и криволинейная конфигурация пальцеобразных выступов под углом к окружности в сторону, противоположную их вращению, определены на основе анализа параметров ротационных рабочих органов, применяемых в сельхозмашинах, и обеспечивают плавный переход клубней между рабочими органами и должны обеспечить устойчивое перемещение клубней, снижение скорости их соударения и повреждения.

Конструкция сортировки с универсальными вибророторами должна обеспечить эффективное выделение примесей и сортирование клубней в требуемом диапазоне технологических регулировок с обеспечением основных технологических операций и вариантов обработки картофеля. Кроме технологической адаптации конструкция нового устройства предусматривает обеспечение технологической надежности с целью предотвращения налипания почвы и забивания рабочих про-светов.

Для осуществления щадящего контакта вибророторов с клубнями, повышения эффективности ориентирования и сортирования клубней будут проведены исследования по обоснованию формы пальцеобразных выступов и их конструкции.

2.2 Ориентирование клубней вибророторами

Конструкция сортирующей поверхности предполагает сортирование клубней по толщине в щелевые отверстия, образованные между соседними вибророторами, расположенными на одном валу. Вибророторы соседних рядов необходимо установить в шахматном порядке без перекрытия. В этом случае увеличивается живое сечение рабочей поверхности, исключается защемление и выдавливание клубней в щелевые отверстия, что присуще роликовым устройствам, где калибрующие отверстия образуются встречно вращающимися поверхностями роликов.

Сортировкам на основе ротоно-пальцевых рабочих органов присущ недостаток – снижение точности сортирования клубней при увеличении подачи про-

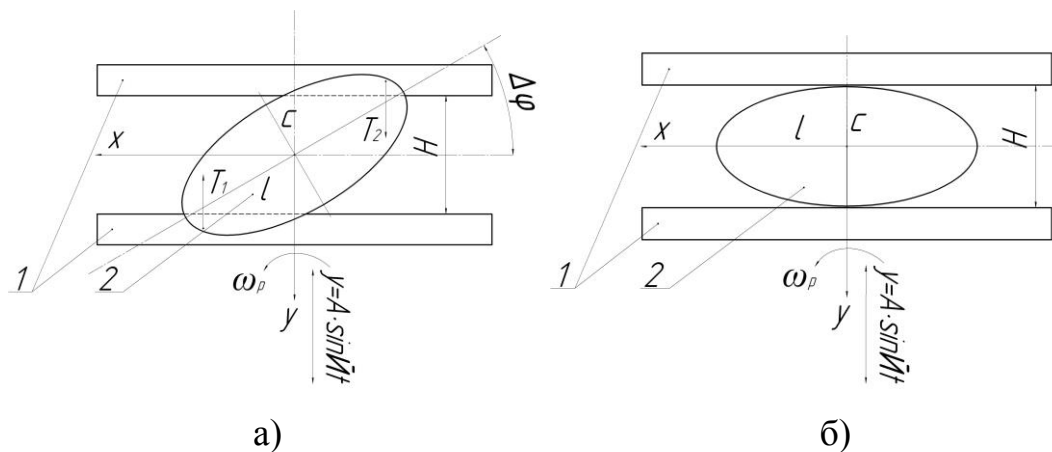
дукта, особенно на сортах с округло-овальной и овально-удлиненной формой. Это объясняется тем, что сортирование происходит в щелевые отверстия и для перемещения и прохождения клубня в калибрующее отверстие необходимо ориентировать его длинной осью вдоль отверстия. Так как время пребывания клубней проходовой фракции над соответствующим участком сортирующей поверхности ограничено, то не все клубни успевают получить необходимое ориентирование. В результате они переходят на следующий участок сортирования и попадают в другую фракцию, что снижает точность сортирования. В тоже время сортирование в щелевые отверстия подразумевает возможность направленного ориентирования клубней [5, 6, 52].

Для осуществления активного направленного ориентирования клубня, находящегося на сортирующей поверхности, к нему необходимо приложить дополнительно силу или момент. В зависимости от формы и положения клубня на сортирующей поверхности он может занимать устойчивое, неустойчивое или хаотичное положение. Вывести клубень из такого положения можно, за счет вибрации рабочих органов в поперечном направлении относительно продольного перемещения клубней, что может создать дополнительный разворачивающий момент и способствовать направленному ориентированию клубней относительно калибрующих отверстий и сократить время сортирования можно за счет поперечных колебаний вибророторов [53]. Вибрационное воздействие на клубень со стороны вибророторов создает момент сил относительно центра клубня, что приведет к его направленному повороту и ориентированию относительно калибрующего отверстия и снизит силы внутреннего трения между клубнями и рабочими органами. При этом амплитуда и частота вибрации вибророторов не должны привести к отрыву и хаотичному перебрасыванию клубней в поперечном направлении. То есть перемещение единичного клубня при вибрации должно осуществляться в пределах калибрующего отверстия, образованного соседними вибророторами. Таким образом, для ускорения процесса ориентации клубней необходим его ограниченный поворот при минимальном смещении центра масс клубня относительно центра калибрующего отверстия.

Ориентирование рассматривается как процесс приведения клубней из любого положения в направленное, т.е. в нашем случае длинной осью эллипсоида вдоль калибрующего отверстия. Этот процесс охарактеризуется рядом количественных и качественных показателей, т.е. количеством переходов из одного положения в другое до совпадения с заданным, а также средствами и способами реализации ориентирования клубней [54].

Таким образом, направленный поворот клубней длинной осью эллипсоида вдоль калибрующего отверстия должен ускорить процесс сравнения размеров калибрующего отверстия с размерами клубней, в данном случае толщиной при безотрывном их перемещении и способствовать повышению производительности и точности сортирования.

Процесс направленного ориентирования возможен при безотрывном перемещении клубней, поэтому примем следующие допущения, клубень захватывается соседними вибророторами и скольжение по ним отсутствует, форму клубня примем виде эллипсоида с полуосями: l – длина, m ; c – толщина клубня, m (рисунк. 2.2 вид сверху).



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

1 – вибророторы; 2 – клубень.

Рисунок 2.2 – Положение клубня над калибрующим отверстием

Наибольшее возмущение клубень получает вокруг оси z – главные центральные оси эллипсоида не совпадают с осью калибрующего отверстия, т.е. клу-

бень расположен длинной осью l не вдоль калибрующего отверстия, а под некоторым углом $\Delta\varphi$, точки контакта относительно центра тяжести, и боковые реакции образуют пару сил с моментом

$$M = -T \cdot H \cdot \operatorname{tg} \Delta\varphi, \quad (2.1)$$

где T – суммарная сила, действующая на клубень со стороны вибророторов, H ($T = T_1 + T_2$).

Так как момент реакций направлен против угла отклонения, его можно считать восстанавливающим, т.е. возвращающим в положение устойчивого движения.

Следовательно, вибрационное воздействие на клубни в поперечном направлении со стороны вибророторов, образующих щелевое калибрующее отверстие, будет создавать момент, способствующий процессу активного направленного ориентирования клубней.

2.3 Обоснование конструктивно-технологической схемы виброротационной сортировки

Технологическая схема виброротационной сортировки разработана на основе исходных параметров конструкции и режимов работы ротационных сепараторов и сортировок [7, 9, 101]. Создание и применение вибророторов новой конструкции обусловлено технологической необходимостью повышения удельной производительности и точности сортирования клубней.

Схема универсальной сортирующей поверхности с непосредственным межоперационным переходом обрабатываемой продукции должна обеспечить повышение эффективности сортирования картофеля, снижение материало-энергоёмкости устройства и повреждения клубней. [47, 61, 66, 77].

Выполнение процессов сепарации и сортирования происходит при подаче клубней картофеля на универсальную сортирующую поверхность в один или полтора слоя. Интенсивное ориентирование клубней относительно калибрующих отверстий происходит при вибрационном и вращательном действии вибророторов.

В результате происходит сложное перемещение клубней относительно калибрующих отверстий. Ориентирование и прохождение клубней через калибрующие отверстия ускоряются за счет сложного виброкинематического действия со стороны вибророторов [6, 32, 36].

Для обеспечения выполнения технологических операций сортирующая поверхность образована из набора параллельных валов (рисунок 2.3), на которых установлены в шахматном порядке без перекрытия вибророторы.

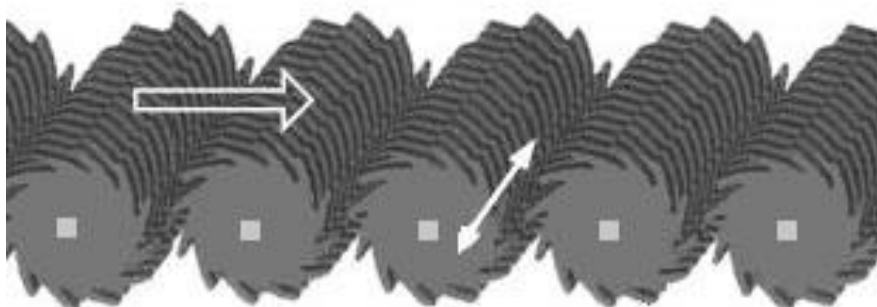


Рисунок 2.3 – Схема сортирующей поверхности

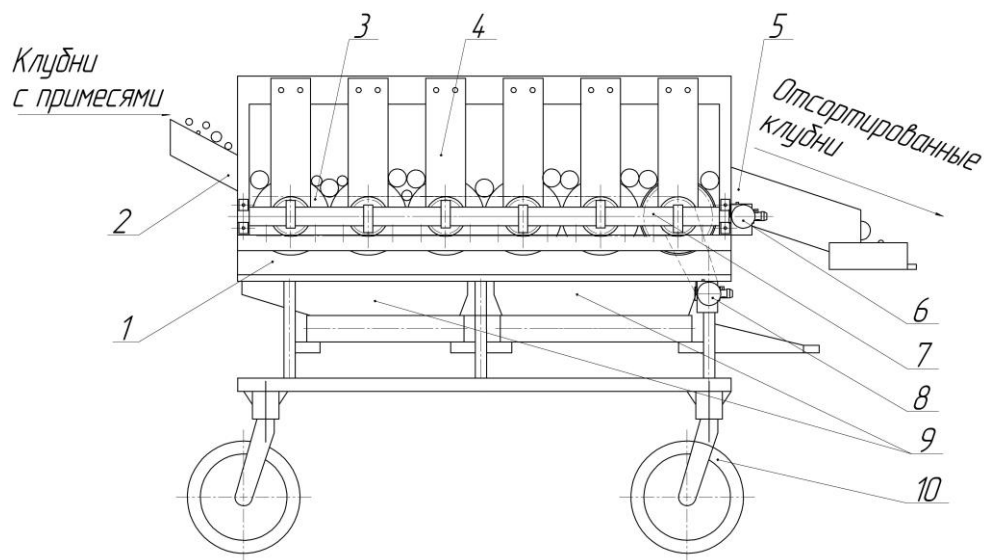
Валы устанавливаются на общей раме в несколько рядов и вращаются в одну сторону с одинаковой угловой скоростью. При этом одновременно с вращением каждый вал совершает вибрационное движение в поперечном направлении как показано двухсторонней стрелкой на рисунке 2.3. Вибрационное движение соседних валов происходит в противофазе для уравнивания масс и системы привода [14, 20, 73]. Обрабатываемая масса движется по сортирующей поверхности в направлении вращения вибророторов как показано крупной стрелкой.

Соседние вибророторы, установленные на одном валу образуют между своими боковыми поверхностями калибрующие отверстия щелевой формы и установлены на соседних валах без перекрытия.

Для регулирования размеров калибрующих отверстий необходимо относительное перемещение вибророторов вдоль вала. Передачу поперечного вибрационного действия осуществляет вибропривод с механизмом двойного эксцентрика.

Для этого валы установлены на упругих подвесках и имеют одну степень свободы.

Виброротационная сортировка (рисунок 2.4) обеспечивает полнооперационный вариант доработки картофеля путем настройки на отделение примесей и сортирование клубней или малооперационный – путем настройки только на сепарацию примесей и мелких клубней. На работу по указанным вариантам сортировку настраивают путем регулировки зазоров между вибророторами и изменения угловой скорости их вращения.



- 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 – самоустанавливающиеся опорные колеса.

Рисунок 2.4 – Конструктивно-технологическая схема виброротационной сортировки

Основная особенность данного устройства заключается в совмещении на одной рабочей поверхности операций отделения примесей и сортирования клубней, а также в обеспечении непосредственного межоперационного перехода клубней с участка отделения примесей на участки сортирования без перепада. Использование щадящего режима движения клубней без отрыва от рабочей поверхности позволит обеспечить низкий уровень механических воздействий на них.

С целью снижения травмирования клубней закладываемых на длительное хранение при осенней доработке картофеля виброротационная сортировка должна обеспечить выполнение малооперационной технологической схемы. Для этого посредством загрузочного конвейера либо приемного бункера ворох картофеля подается на рабочую поверхность для выделения просеивающихся почвенных, растительных примесей и фуража (клубней массой до 25г). Далее путем непосредственного межоперационного перехода картофель поступает на следующий участок, где выделяется мелкая фракция. Средняя и крупная фракции идут в сход. Дополнительная переборка картофеля крупной и средней фракции перед закладкой может осуществляться на выгрузных конвейерах или переборочном столе. Поэтому при малооперационной обработке выполняется только сепарация примесей и выделение мелких клубней без сортирования картофеля.

При полнооперационной схеме обработки, универсальная сортировка настраивается на сепарацию примесей и разделение картофеля на мелкую, среднюю и крупную фракции.

Аналогично первому варианту ворох картофеля подается на участок выделения примесей и клубней мелкой фракции. Первый по ходу технологического процесса скатной лоток 9 выполнен с днищем из гладких обрезиненных прутков, расположенных с зазором для выделения примесей. Прутки лотка закреплены консолеобразно и под действием падающих клубней происходит вибрационное воздействие на примеси и клубни, что способствует лучшему скатыванию клубней и очистке от примесей. Клубни мелкой фракции скатываются по лотку, а примеси просеиваются в зазоры между прутками. Далее путем непосредственного межоперационного перехода картофель поступает на участок сортирования средней фракции. Клубни крупной фракции идут в сход. Отсепарированные примеси и выделенные в определенную фракцию клубни, посредством отводных конвейеров выносятся за пределы сортировки для затаривания в емкости, реализации или закладки в закром на хранение.

2.4 Исследования перемещения клубней по сортирующей поверхности

Аналитический обзор процессов сепарации примесей и сортирования клубней на ротационных устройствах указывает на преимущество безотрывного перемещения обрабатываемого вороха по рабочей поверхности, позволяющее реализовать направленное ориентирование клубней. Применение безотрывного режима транспортирования позволяет ограничить относительные перемещения с подбрасыванием клубней и соответственно скорость соударения с рабочими органами и между собой [7, 100]. Поэтому выбор рационального режима функционирования вибророторов должен обеспечить щадящую обработку вороха картофеля без повреждений.

В качестве первого условия для эффективного сортирования принимается режим подачи и перемещения сортируемой продукции по рабочей поверхности в один или полтора слоя. Второе условие эффективного сортирования заключается в обеспечении безотрывного и устойчивого перемещения клубней относительно калибрующих отверстий сортирующей поверхности. Это достигается путем обоснования кинематического режима вибророторов, а также частоты и амплитуды их вибрации для реализации различных вариантов технологического процесса.

По данным [24, 37, 55] при режиме перемещения клубней с отрывом от рабочей поверхности снижается вероятность прохождения клубней сквозь калибрующие отверстия. На виброротационной сортировке это может происходить вследствие полувзвешенного состояния клубней относительно вибророторов, перебрасывания клубней на соседние ряды и прекращение ориентирования их относительно калибрующих отверстий. Использование указанного режима может приводить к повышению повреждений клубней, вследствие увеличения скорости соударения с рабочими органами и необходимости удлинения рабочей поверхности [29, 86]. Это связано с увеличением нормальной составляющей ускорения вибророторов и нарушения условия безотрывного движения, а также вследствие отражения клубней вверх при ударе о кромку калибрующего отверстия.

В предшествующих разделах были исследованы вопросы, связанные с обоснованием конструктивно-технологической схемы универсальной сортировки и конструкции вибророторов, обеспечивающие щадящую обработку вороха картофеля при условии безотрывного перемещения клубней. Поэтому режим угловой скорости вращения вибророторов необходимо выбрать таким, чтобы перемещение клубней по сортирующей поверхности было безотрывным, но устойчивым, для обеспечения производительности устройства и исключения сгуживания клубней. То есть основная часть клубней должна перемещаться по сортирующей поверхности, без длительного вращения между соседними рядами вибророторов на одном месте и сгуживания. Такой режим работы позволит обеспечить производительность сортирующей поверхности [36].

Рассмотрим силы, действующие на клубень, находящийся на вращающейся наружной грани пальцеобразного выступа виброротора в момент подъема и удержания клубня (рисунок 2.5).

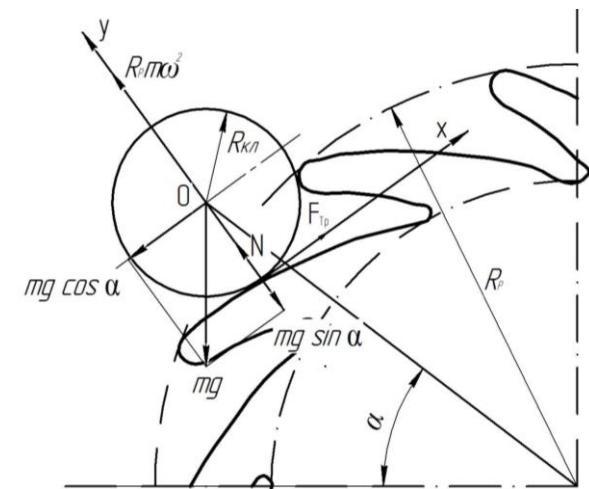


Рисунок 2.5 – Силы, действующие на клубень при контакте с виброротором

Определим угловую скорость вращения виброротора, при которой клубень будет оставаться на его поверхности без проскальзывания. Для этого спроецируем все силы и моменты, действующие на клубень [10, 49], на оси x , y , z .

Составим систему уравнений:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = \sum F_{kx} \\ m\ddot{y} = \sum F_{ky} \\ J_z \ddot{\phi} = \sum M_z \cdot (\overline{F_k}) \end{cases} \quad (2.2)$$

Спроецируем все силы на ось x:

$$m\ddot{x} = ma^n = F_{mp} - mg \cdot \cos \alpha, \quad (2.3)$$

где m – масса клубня, кг;

α – угол, определяющий начальное положение клубня, град;

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

f – коэффициент трения качения ($f = 0,7$) [34, 24].

Сила трения F_{mp} удерживает клубень на пальцеобразном выступе виброротора, а сила $mg \cdot \cos \alpha$ стремится скатить клубень вниз.

Спроецируем все силы на ось y:

$$m\ddot{y} = ma^r = N - mg \cdot \sin \alpha + m \cdot \omega_p^2 \cdot R_p, \quad (2.4)$$

где N – нормальная реакция виброротора, Н;

mg – сила тяжести, Н;

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

R_p – радиус виброротора, м.

Сила нормальной реакции виброротора N и сила инерции будут способствовать отрыву клубня от поверхности, а сила тяжести ($mg \cdot \sin \alpha$) способствует удержанию его на поверхности виброротора. Клубень будет оставаться на пальцеобразном выступе виброротора, если сумма всех сил, по оси y, будет равна нулю (т.е. они уравновесят друг друга).

Спроецируем моменты на ось z

$$J_z \cdot \ddot{\phi} = F_{mp} \cdot R_{кл} - M_T, \quad (2.5)$$

где $R_{кл}$ – радиус клубня, м;

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

Система уравнений примет вид

$$\begin{cases} m\ddot{x} = ma^n = F_{mp} - mg \cdot \cos \alpha, \\ m\ddot{y} = ma^\tau = N - mg \cdot \sin \alpha + m \cdot \omega_p^2 \cdot R_p, \\ J_z \ddot{\phi} = F_{mp} \cdot R_{кл} - M_T. \end{cases} \quad (2.6)$$

Данные уравнения описывают движение клубня по сортирующей поверхности и для того чтобы он удерживался на вибророторе и перемещался вместе с ним, необходимо чтобы выполнялось условие

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_{mp} - mg \cdot \cos \alpha = 0 \\ m\ddot{y} = N - mg \cdot \sin \alpha + m \cdot \omega_p^2 \cdot R_p = 0 \\ J_z \ddot{\phi} = F_{mp} \cdot R_{кл} - M_T = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Выразим из уравнения моментов $J_z \ddot{\phi} = F_{mp} \cdot R_{кл} - f \cdot N \cdot R_{кл} = 0$ силу нормальной реакции N

$$N = \frac{F_{TP}}{f} = \frac{f \cdot mg \cdot \cos \alpha}{f} \quad (2.8)$$

и подставим её в уравнение $m\ddot{y} = N - mg \cdot \sin \alpha + m \cdot \omega_p^2 \cdot R_p = 0$, затем выразим ω_p

$$\omega_p = \sqrt{\frac{g \cdot \sin \alpha}{R_p} - \frac{g \cdot \cos \alpha}{R_p}}, \quad (2.9)$$

С учетом того, что виброротационная сортировка должна обеспечить выполнение различных вариантов послеуборочной доработки картофеля, то для этого необходимо, чтобы клубни всех фракций, включая мелкую, перемещались по поверхности устойчиво (в случае сепарации только примесей или выделении мелкой фракции).

Принимая согласно результатов натурных замеров угол, определяющий начальное положение клубня на пальцеобразном выступе виброротора, $\alpha = 55^\circ$ как минимальный для клубней мелкой фракции, найдем угловую скорость вращения вибророторов ω_p при которой клубни, начиная с мелкой фракции, будут устойчиво перемещаться по сортирующей поверхности:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{9,8 \cdot 0,81}{0,1} - \frac{9,8 \cdot 0,59}{0,1}} = 4,96 \text{ с}^{-1}.$$

В результате проведенных исследований определена угловая скорость вращения вибророторов $\omega_p = 4,96 \text{ с}^{-1}$ при которой клубни будут устойчиво перемещаться. Для дальнейших расчетов принимаем округленное значение $\omega_p = 5 \text{ с}^{-1}$.

2.5. Обоснование формы пальцеобразных выступов вибророторов

Вибрационное движение рабочих органов сортировки может привести к повреждению клубней при их взаимодействии с пальцеобразными выступами вибророторов в случае наличия у них граней под прямым углом. Поэтому необходимо обосновать форму наружной поверхности пальцеобразных выступов с позиции минимальной устойчивости клубней и снижения повреждений при вибрационном воздействии на них.

Форма пальцеобразных выступов будет непосредственно определять эффективность процесса сортирования. Чем менее устойчивым будет положение клубня на поверхности выступа, тем быстрее клубень переместится с него в калибрующее отверстие [57].

В результате анализа конструкции ротационных рабочих органов сепараторов и сортировок предложена сферическая форма рабочей поверхности пальцеобразного выступа виброротора в поперечном сечении (рисунок 2.6).

Такая форма будет стимулировать скатывание клубня в поперечном направлении, ускорение его разворота и прохождения в калибрующее отверстие. Кроме указанного, это увеличит пятно контакта виброротора с клубнем и снизит вероятность повреждения клубней при вибрации.

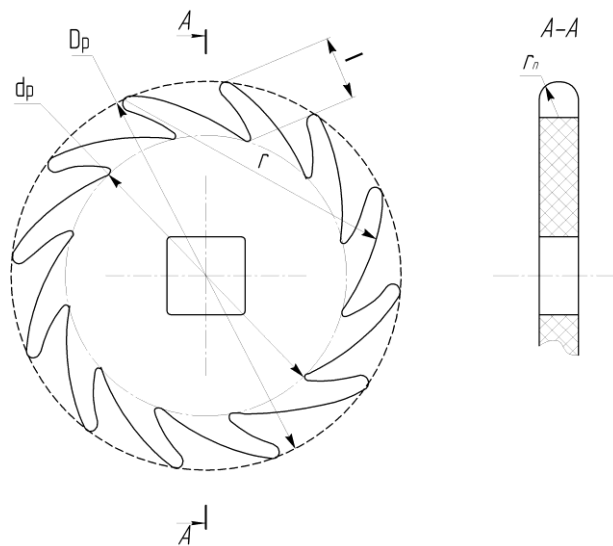
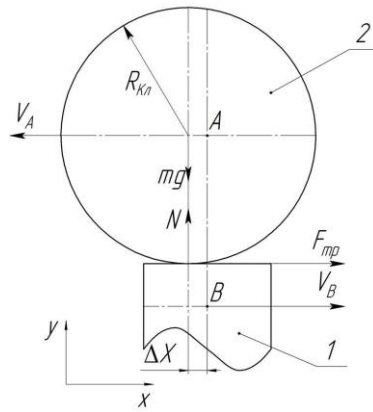


Рисунок 2.6 – Конструкция виброротора со сферическими пальцеобразными выступами в поперечном сечении

Перемещаясь по сортирующей поверхности, клубни постоянно контактируют с вибророторами и между собой. Для осуществления перемещения клубня в калибрующее отверстие он должен расположиться между двумя соседними вибророторами, расположенными на одном валу и чем менее устойчивым будет положение клубня на вибророторе, тем быстрее он попадет в калибрующее отверстие. Наиболее устойчивое положение клубня наблюдается при совпадении центра тяжести клубня с осью симметрии виброротора. Рассмотрим этот случай с позиции сил и моментов, действующих на клубень, и подберем наиболее подходящую форму пальцеобразного выступа, обеспечивающую минимальную устойчивость клубня [12, 49].

По данным [7, 9] рабочие органы сортировок на основе роторно-пальцевых имели в поперечном сечении прямоугольную форму пальцев с углами 90° рисунок 2.7.

Рассмотрим силы, действующие на клубень, находящийся на пальцеобразном выступе прямоугольной формы (рисунок 2.7).



1 – пальцеобразный выступ виброротора; 2 – клубень.

Рисунок 2.7 – Силы, действующие на клубень, находящийся на пальцеобразном выступе прямоугольной формы

При вибрации в поперечном направлении на клубень будут действовать: сила трения F_{mp} , сила тяжести mg , сила реакции поверхности пальцеобразного выступа N , сила инерции J_z . Клубень начнет перемещаться по поверхности выступа и будет совершать сложное движение, описываемое системой уравнений

$$\begin{cases} m\ddot{x} = \sum F_{kx} \\ m\ddot{y} = \sum F_{ky} \\ J_z\ddot{\varphi} = \sum M_z \cdot (\overline{F_k}) \end{cases}, \quad (2.10)$$

Направим ось x в том же направлении, что и силу трения F_{mp} , ось y вертикально, а вращающий момент будем считать положительным, если он направлен против часовой стрелки.

Спроецируем все силы на ось x

$$m\ddot{x} = m \cdot a^n = F_{mp}, \quad (2.11)$$

где m – масса клубня, кг;

a^n – нормальное ускорение, m/c^2 ;

Из этого уравнения следует, что по оси x на клубень действует только сила трения F_{mp} , которая и будет создавать нормальное ускорение.

Спроецируем все силы на ось y

$$m\ddot{y} = ma^r = N - mg, \quad (2.12)$$

где N – нормальная реакция, H ;

mg – вес клубня, H ;

a^r – тангенциальное ускорение, m/c^2

В рассматриваемый момент времени клубень движется только по оси x , следовательно тангенциального ускорения по оси y нет и $m\ddot{y} = 0$, $N = mg$.

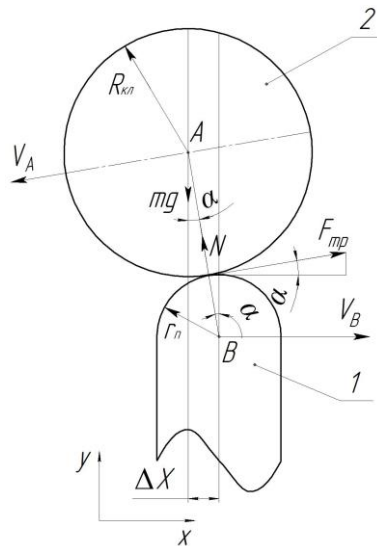
Вращающий момент будет создавать сила трения F_{mp} :

$$J_z \ddot{\varphi} = F_{mp} \cdot R_{кл}, \quad (2.13)$$

где $R_{кл}$ – радиус клубня, m .

Таким образом, при вибрационном взаимодействии клубней и пальцеобразных выступов прямоугольной формы с значением амплитуды меньшим, чем половина толщины выступа не возникает ускорение скатывания клубня с пальцеобразного выступа, так как перемещение клубня происходит по ровной поверхности.

Теперь проанализируем сферическую в поперечном сечении форму пальцеобразного выступа (рисунок 2.8).



1 – пальцеобразный выступ виброротора; 2 – клубень.

Рисунок 2.8 – Силы, действующие на клубень, находящийся на пальцеобразном выступе сферической формы

В самом неблагоприятном для сортирования положении, когда центр симметрии клубня располагается над центром симметрии пальцеобразного выступа, система уравнений сложного движения будет аналогичной системе (2.10).

При вибрации в поперечном направлении через некоторый момент времени центр симметрии клубня сместится относительно центра симметрии виброротора.

Пусть смещение будет очень малым, и обозначим его Δx .

Составим уравнение движения и спроецируем все силы на ось x

$$m\ddot{x} = ma^n = F_{mp} \cdot \cos \alpha \quad (2.14)$$

Так как в этом случае клубень будет совершать перемещение не по прямой, а по дуге окружности сила трения F_{mp} будет направлена под углом к оси x , следовательно, она уменьшится.

Спроецируем все силы на ось y

$$m\ddot{y} = ma^r = N \cdot \cos \alpha - mg \quad (2.15)$$

Движение будет происходить не только по оси x , но и по оси y , следовательно, $m\ddot{y} \neq 0$ и появится тангенциальное ускорение.

Определим вращающие моменты

$$J_z \ddot{\varphi} = F_{mp} \cdot R_{кл} + mg \cdot (R_{кл} \cdot \sin \alpha) \quad (2.16)$$

Это уравнение показывает, что у виброротора со сферическими в поперечном сечении пальцеобразными выступами даже после очень малого смещения центра симметрии клубня от центра симметрии виброротора будет возникать дополнительный вращающий момент, $mg \cdot (R_{кл} \cdot \sin \alpha)$ который будет способствовать более быстрому перемещению клубня в калибрующее отверстие и система уравнений дополнится

$$\begin{cases} m\ddot{x} = ma^n = F_{mp} \cdot \cos \alpha \\ m\ddot{y} = ma^r = N \cdot \cos \alpha - mg \\ J_z \ddot{\varphi} = F_{mp} \cdot R_{кл} + mg \cdot (R_{кл} \cdot \sin \alpha) \end{cases} \quad (2.17)$$

Следовательно, сферическая форма пальцеобразного выступа виброротора должна ускорить процесс перемещения клубня в калибрующее отверстие, что бу-

дет способствовать повышению эффективности и точности сортирования и снижению точечной нагрузки на клубень от вибрации.

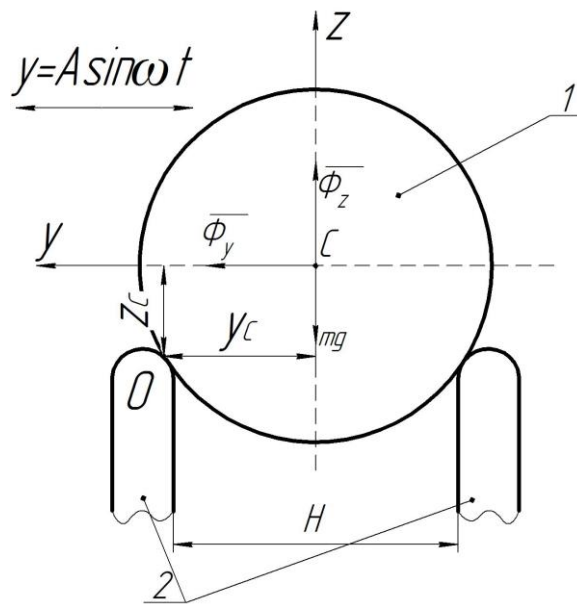
Для определенных ранее параметров виброротора $D_p = 0,2 \text{ м}$, $d_p = 0,14 \text{ м}$, $T = 0,02 \text{ с}$, радиус скругления составит $r_n = 0,01 \text{ м}$.

2.6. Определение параметров вибрации и силовых характеристик взаимодействия клубней с вибророторами

При воздействии вибрации на клубни с ними могут происходить различные явления, определяемые интенсивностью вибрации. Подбирая определенный уровень вибрационного воздействия, можно усиливать действие невибрационных сил [17].

При сортировании прохождение клубней через калибрующие отверстия, т.е. разделение на фракции производится в основном за счет сил их веса. Условием прохождения является наличие относительного движения между клубнями и сортирующей поверхностью. Этому способствует вращательное и вибрационное действие вибророторов с определенными и обоснованными значениями амплитуды и частоты. Значения этих параметров определяют варианты перемещения клубней по сортирующей поверхности с отрывом или в безотрывном режиме. Перемещение клубней должно осуществляться в пределах калибрующего отверстия. То есть, заданная частота и амплитуда вибрации не должны приводить к перебрасыванию клубней в поперечном направлении на соседние вибророторы. Для выполнения этого условия проведем исследования по обоснованию рациональных параметров вибрационных воздействий, которые должны обеспечить частичную подвижность клубней в пределах калибрующего отверстия.

Рассмотрим положение клубня над калибрующим отверстием. При контакте с вибророторами (рисунок 2.9) он испытывает периодические вибрационные воздействия, направленные по оси y .



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

Рисунок 2.9 – Силы, действующие на клубень при вибрации

Для того чтобы, клубень находился над калибрующим отверстием необходимо определить предел максимального возмущения воспринимаемого им со стороны вибророторов, не допускающее отрыв и боковое перемещение клубня на соседние калибрующие отверстия.

С учетом того, что вибрационная сила воздействует на клубень по закону

$$y = A \sin \omega_g t, \quad (2.18)$$

Максимальная сила инерции, действующая на клубень по оси y и z будет

$$\Phi_y = m \cdot A \cdot \omega_g^2, \quad (2.19)$$

$$\Phi_z = m \cdot A \cdot R_p^2 \quad (2.20)$$

где m – масса клубня, кг;

A – максимальная амплитуда вибрации, м;

ω_g – угловая частота вибрации, c^{-1} .

R_p – радиус виброротора, м.

Условие, при котором отсутствовало бы перемещение клубня на соседние вибророторы, можно определить из уравнения моментов, действующих на него относительно точки O

$$M_0 = \Phi_y \cdot z_c - (mg - \Phi_z) \cdot y_c < 0, \quad (2.21)$$

Преобразуя выражение (2.21) получим

$$\Phi_y < \frac{y_c}{z_c} (mg - m \cdot \omega_p^2 \cdot R_p), \quad (2.22)$$

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

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

Усилим неравенство, приняв $m \cdot A \cdot \omega_\theta^2 < \frac{y_c}{z_c} (mg - m \cdot \omega_p^2 \cdot R_p)$, тогда угловую частоту вибрации при которой клубень останется в пределах калибрующего отверстия можно определить из выражения

$$\omega_\theta < \sqrt{\frac{\frac{y_c}{z_c} (g - \omega_p^2 \cdot R_p)}{A}} \quad (2.23)$$

Учитывая тот факт, что процесс сортирования на виброротационной сортировке не предусматривает перемещение клубней с помощью вибрации, а наоборот, то необходимо учесть, что согласно [17], модуль средней скорости движения частицы по вибрирующей поверхности прямо пропорционален амплитуде колебаний. При постоянной частоте колебаний, модуль средней скорости движения частицы возрастает с увеличением амплитуды колебаний.

Согласно результатам натурных испытаний воздействия вибрации на клубни картофеля [17] принимаем для теоретических расчетов значение амплитуды вибрации $A = 3 \text{ мм}$. При данном значении амплитуды транспортирующая составляющая движения клубней практически отсутствует и увеличение частоты колебаний вызывает незначительное (до 5 %) увеличение скорости транспортирования.

Согласно условию безотрывного перемещения клубней по сортирующей поверхности и выполнения условия ориентирования их вибророторами, центр клубня клубень должен располагаться как можно ниже между вибророторами.

Минимальные значения при которых выполняется это условие, согласно натуральных измерений соответствует отношению $\frac{y_c}{z_c} = 1,5$.

Подставляя численные значения в полученное выражение определим максимальное значение угловой частоты вибрации, при котором будет отсутствовать отрыв клубня от поверхности вибророторов.

$$\omega_g = \sqrt{\frac{1,5 \cdot (9,8 - 5^2 \cdot 0,1)}{0,003}} = 60,4 \text{ с}^{-1}, \text{ что в переводе составляет } \nu = 9,6 \text{ Гц}.$$

Полученные расчетные значения параметров вибрации рабочих органов сортирующей поверхности необходимо учесть с позиции силового воздействия на клубни и отсутствия повреждений. При перемещении картофеля по сортирующей поверхности имеет место соударение клубней с вибророторами и друг о друга. При этом немаловажную роль играют упругие свойства клубней, которые характеризуются коэффициентом восстановления k_g , который зависит от материала соударяющихся тел, скорости удара, массы, влажности и точки соударения. Кроме указанного модуль упругости пальцеобразных выступов виброротора должен иметь значение, исключающее травмирование клубней во время взаимодействия и при перемещении.

Имеется взаимосвязь между кинетической энергией клубня, коэффициентом восстановления скорости клубня при ударе и количеством энергии, поглощенной клубнем и вызывающей его повреждения.

Количество поглощенной энергии W , идущее на повреждение мякоти, может быть определено по известной зависимости [86]

$$W = \frac{m \cdot V^2}{2} \cdot (1 - k_g), \quad (2.24)$$

где m - масса клубня, кг;

V – скорость движения клубня, м/с.

Исследуя удар клубней о металлическую плиту, В.И. Табачук установил, что повреждения клубней начинаются при поглощении ими энергии $W = 0,008 - 0,018 \text{ кг} \cdot \text{м}$. Он указывает, что чем выше коэффициент восстановления

клубня k_g , тем меньше их повреждаемость. Исходя из допустимых значений W , и зная скорость и массу клубня по значениям коэффициента k_g можно определить силовые характеристики взаимодействия вибророторов и клубней при вибрации. Допустимая скорость соударения среднего клубня с вибророторами исходя из величин $W = 0,013 \text{ кг} \cdot \text{м}$; $m_k = 59 \text{ г}$; $k_g = 0,75$ будет равна $V_k = 1,32 \text{ м/с}$.

Одним из основных вопросов обеспечения качественных показателей процесса сортирования является определение влияния величины деформации пальцеобразных выступов виброротора на точность сортирования при вибрационном взаимодействии с клубнями. При значительной деформации во время контактов с клубнями могут изменяться установленные размеры и геометрия калибрующих отверстий, что снизит точность сортирования. При вибрационном взаимодействии вибророторов и клубней возможны также повреждения последних [28, 72].

При рассмотрении вибрационного взаимодействия клубня с пальцеобразным выступом виброротора примем следующие допущения: клубни имеют сферическую форму; поверхности контактирующих тел гладкие; клубни абсолютно упругие; масса клубней крупной фракции 120 гр.; проскальзывание при контакте клубня с виброротором отсутствует.

Попадая на сортирующую поверхность, клубень взаимодействует со сферической поверхностью пальцеобразных выступов и приобретает подвижность (рисунок 2.10).

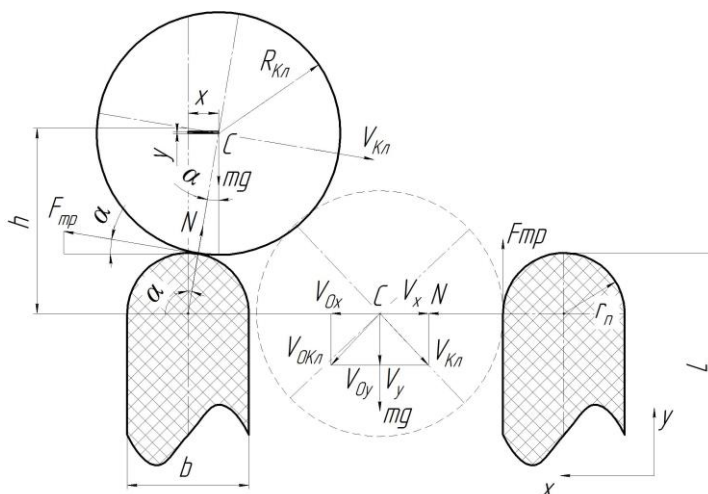


Рисунок 2.10 – Взаимодействие клубня с калибрующим отверстием

При этом на него действуют силы по оси x

$$m\ddot{x} = \sum F_x = -N \cdot \sin \alpha + F_{mp} \cdot \cos \alpha, \quad (2.25)$$

по оси y

$$m\ddot{y} = mg - F_{mp} \cdot \sin \alpha - N \cdot \cos \alpha = mg - f \cdot m g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha - m g \cdot \cos^2 \alpha, \quad (2.26)$$

где: m – масса клубня, кг;

$\ddot{x}$ – нормальное ускорение, m / c^2 ;

N – нормальная реакция поверхности пальцеобразного выступа виброротора ($N = mg \cdot \cos \alpha$), H ;

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

f – коэффициент трения движения клубня о материал виброротора.

Из уравнений (2.25) и (2.26) получаем выражения, определяющие движение клубня по осям x и y :

$$x = \frac{-g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha + f \cdot g \cdot \cos^2 \alpha}{2} \cdot t^2, \quad (2.27)$$

$$y = \frac{g - f \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha - g \cdot \cos^2 \alpha}{2} \cdot t^2, \quad (2.28)$$

Из полученных уравнений найдем скорость, с которой клубень перемещается с пальцеобразного выступа виброротора в калибрующее отверстие. При экспериментальных исследованиях в лабораторных условиях было определено, что минимальная величина перемещения центра клубня при устойчивом продвижении по оси x к калибрующему отверстию составляет $x = 0,015$ м (рисунок 2.10). В этом случае угол α равен $25^\circ 21'$ ($\cos 25^\circ 21' = 0,9$, $\sin 25^\circ 21' = 0,4$). При перемещении клубня по оси x на $0,015$ м, перемещение по оси y определяется по зависимости

$$y = (R_{кл} + r_n) - \sqrt{(R_{кл} + r_n)^2 - x^2}, \quad (2.29)$$

где $R_{кл} = 0,025$ м – радиус клубня с массой $0,120$ кг;

$r_n = 0,01$ м – радиус конечной части пальцеобразного выступа виброротора.

Подставляя значения радиусов в зависимость (2.29) получим величину перемещения клубня по оси y

$$y = (0,025 + 0,01) - \sqrt{(0,025 + 0,01)^2 - 0,015^2} = 0,00335 \text{ м}.$$

Подставляя значения x и y в уравнения (2.27) и (2.28), находим время перемещения клубня по оси x : $t_x = 0,261 \text{ с}$, по оси y : $t_y = 0,261 \text{ с}$. Используя полученные значения расстояния и времени движения клубня по осям, получим скорости его движения по оси x : $V_x = 0,058 \text{ м/с}$, по оси y : $V_y = 0,013 \text{ м/с}$. Результирующая скорость движения клубня составит $V = 0,059 \text{ м/с}$.

Для исследования процесса вибрационного взаимодействия клубня с выступами виброротора при дальнейшем его перемещении в калибрующее отверстие применим теорему импульсов:

$$m V_{ox} - m V_x = P \cdot \tau, \quad (2.30)$$

$$m V_{oy} - m V_y = f \cdot P \cdot \tau, \quad (2.31)$$

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

V_{ox} и V_{oy} – проекции скорости его отражения на те же оси координат, м/с ;

P – значение ударной нормальной реакции, Н ;

τ – время контакта клубня с пальцем, с .

Из схемы (рисунок 2.10) следует, что V_x имеет отрицательный знак

$$V_{ox} = -k_{\epsilon} \cdot V_x, \quad (2.32)$$

где k_{ϵ} – коэффициент восстановления скорости, характеризующий упругие свойства контактирующих тел при ударе.

Из выражения (2.32) с учетом (2.30) при абсолютных значениях величин можем определить величину ударной нормальной реакции

$$P = \frac{-m \cdot k_{\epsilon} \cdot V_x - m V_x}{\tau}, \quad (2.33)$$

Величина деформации δ крайней точки пальцеобразного выступа виброротора может быть определена по методу Верещагина

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot J}, \quad (2.34)$$

где L – высота пальцеобразного выступа, $м$;

$E = 5 \cdot 10^6$ Па – модуль упругости эластичного материала виброротора, включая пальцеобразные выступы [59];

δ – деформация выступа в результате приложения нагрузки, $м$;

J – момент инерции сечения выступа, $м^4$.

В рассматриваемом случае имеет место динамическое нагружение пальцеобразного выступа виброротора, поэтому введём коэффициент динамичности k_d

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot h}{\delta_{\max}}}, \quad (2.35)$$

где h – высота перемещения клубня по выступу, $м$;

$\delta_{\max}$ – максимальная деформация пальцеобразного выступа виброротора в результате приложения нагрузки, $м$.

В рассматриваемом случае $h = 0,035$ $м$, $\delta_{\max} = 0,002$ $м$ – результаты натурных экспериментов.

Подставляя эти значения в уравнение (2.35) получим $k_d = 7$.

Для динамической нагрузки величина ударной нормальной реакции P может быть определена по выражению

$$P = \frac{3 \cdot E \cdot J \cdot \delta_{\text{стат}} \cdot k_d}{L^3} \quad (2.36)$$

Приравнивая уравнения (2.36) и (2.33), находим время контакта клубня с виброротором τ

$$\tau = \frac{(-m \cdot k_v \cdot V_x - m \cdot V_x) \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot J \cdot \delta_{\text{стат}} \cdot k_d}, \quad (2.37)$$

где $\delta_{\text{стат}}$ – статическое перемещение крайней точки пальцеобразного выступа от приложения единичной нагрузки, м.

Оно определяется известным выражением

$$\delta_{\text{стат}} = \frac{(m \cdot a) \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot J}, \quad (2.38)$$

где a – ускорение клубня, м/с².

На основе уравнений (2.25) и (2.26) и лабораторных исследований были определены величины ускорений при движении клубней: ускорение по оси x : $a_x = 0,441 \text{ м/с}^2$; по оси y : $a_y = 0,98 \text{ м/с}^2$. Полное ускорение клубня составит $a = 0,452 \text{ м/с}^2$.

Принимаем пальцеобразный выступ виброротора за консольную балку со сторонами сечения $a = 0,01 \text{ м}$ и $b = 0,02 \text{ м}$. Момент инерции J данного сечения равен

$$J = \frac{0,01 \cdot 0,02^3}{12} = 6,667 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$$

Подставляя полученные значения величин в выражение (2.38), определяем статическое перемещение крайней точки выступа от приложения единичной нагрузки $\delta_{\text{стат}} = 1,464 \cdot 10^{-5} \text{ м}$. Зная $\delta_{\text{стат}}$ и время контакта $\tau = 0,026 \text{ с}$, по формуле (2.36) получаем значение ударной нормальной реакции в этом контакте $P = 0,379 \text{ Н}$.

Деформация от приложения динамической нагрузки $\delta_{\text{дин}}$

$$\delta_{\text{дин}} = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot J}, \quad (2.39)$$

В результате расчетов получили $\delta_{\text{дин}} = 1,025 \cdot 10^{-4} \text{ м}$

При ударе о пальцеобразный выступ виброротора клубень будет поглощать энергию равную

$$W = \delta_{\text{дин}} \cdot P, \quad (2.40)$$

$$W = 0,0001 \cdot 0,379 = 0,00004 \text{ Дж}$$

При данном уровне скоростей и ускорений движения клубней по сортирующей поверхности и возникающих при этом величин силовых реакций повреждения их практически исключены.

С использованием вышеприведенных зависимостей и полученных данных установлено, что деформация пальцеобразного выступа виброротора по крайней его точке от приложения динамической нагрузки составит $\delta_{\text{дин}} = 1,025 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

Полученное значение величины деформации при взаимодействии с клубнем крупной фракции очень мало и фактически не изменяет геометрию калибрующего отверстия.

Выводы:

- в результате теоретических исследований определена конструкция универсального рабочего органа – виброротора с пальцеобразными выступами, которая способна обеспечить сортирование клубней и сепарацию примесей и на одной рабочей поверхности с образованием калибрующих отверстий щелевой формы;
- доказано, что вибрационное воздействие в поперечном направлении со стороны вибророторов создает разворачивающий момент, способствующий активному направленному ориентированию клубней и повышению качественных показателей процесса сортирования;
- разработана технологическая схема виброротационной сортировки с универсальной рабочей поверхностью для сортирования клубней и сепарации примесей, позволяющая совместить вращательное и вибрационное действие вибророторов на клубни;
- обоснованы параметры угловой скорости вращения вибророторов $\omega_p = 5 \text{ с}^{-1}$ и вибрации (амплитуда – $A = 3 \text{ мм}$, частота – $\nu = 9,6 \text{ Гц}$), обеспечивающие устойчивое перемещение клубней по рабочей поверхности и интенсификацию процесса сортирования, при условии отсутствия повреждений клубней и сохранения геометрии калибрующих отверстий.

3. Программа и методика экспериментальных исследований

3.1. Программа экспериментальных исследований

На основании теоретических исследований разработана общая схема нового виброротационного сортирующего устройства, определены технологические процессы, основные конструктивные и кинематические параметры.

Экспериментальное устройство предназначено как для выполнения полного цикла операций обработки вороха картофеля: сепарации примесей, выделения нестандартных клубней весом до 25 гр. и разделения на три фракции так и для малооперационной обработки без сортирования. При выполнении малооперационного варианта производится первичная доработка вороха картофеля при максимально возможной производительности. Это необходимо для обеспечения поточной доработки картофеля поступающего с поля и закладываемого на длительное хранение с условием минимального повреждения клубней.

Основными параметрами виброротационной сортировки для исследований в лабораторных условиях приняты значения параметров, определенные в теоретических исследованиях – угловая скорость вращения вибророторов $\omega_p = 5 \text{ с}^{-1}$, амплитуда вибрации $A = 3 \text{ мм}$ и частота $\nu = 9,6 \text{ Гц}$, диапазон регулирования расстояний между вибророторами от 20 мм до 60 мм.

Производительность сортировки можно определить из известного уравнения подачи продукта в машинах непрерывного транспорта с высотой слоя в один клубень. Средняя плотность обрабатываемой массы клубней – 650 кг/м^3 [8, 24]. Исходя из допущения, что скорость клубней при перемещении по сортирующей поверхности равна окружной скорости вибророторов при их радиусе 0.1 м диапазон скорости клубней по сортирующей поверхности составил 0,35 – 0,55 м/с при условии устойчивого перемещения обрабатываемого вороха без подбрасывания клубней. С учетом этих значений и ширины рабочей поверхности – 0,7 м производительность составит 14,4 т/ч.

Экспериментальные исследования проводились в два этапа: на первом – провели лабораторные; на втором – производственные исследования виброротационной сортировки. Программой лабораторных исследований предусматривалось следующее:

- разработать конструкторскую документацию и изготовить экспериментальный образец универсальной виброротационной сортировки;
- исследовать процесс перемещения и ориентирования клубней при взаимодействии с вибророторами при изменении режимов кинематики и вибрации;
- исследовать процесс сепарации примесей при изменении режимов кинематики и вибрации;
- исследовать совместное действие основных факторов на процесс сортирования клубней и определить их рациональные значения;
- получить интерполяционную формулу для предсказаний значений точности сортирования клубней, зависящих от ряда факторов, определить оптимальные параметры и режимы работы виброротационной сортировки.

Программой экспериментальных исследований в производственных условиях предусмотрено:

- исследование согласованности и технологической универсальности функционирования участков сепарации примесей и сортирования клубней;
- оценка возможности обеспечивать выполнение технологического процесса и сохранять основные параметры при обработке вороха картофеля повышенной влажности и с большим содержанием примесей.

3.2. Методика проведения экспериментов в лабораторных условиях

3.2.1. Исследование устойчивости перемещения клубней и сепарации примесей

Лабораторные исследования универсальной виброротационной поверхности для выделения примесей и сортирования картофеля проводили в соответствии с программой на основании классических и разработанных в диссертации методов планирования экспериментов при проведении исследований процессов и машин для послеуборочной доработки картофеля и овощей [50, 68].

В результате опытов планировали проверить и уточнить конструктивные и кинематические параметры нового устройства, обеспечивающие согласованность и технологическую универсальность.

На первом этапе определили верхние значения параметров вибрационного воздействия на клубни, которые не приводят к отрыву от сортирующей поверхности и нижние, действие которых не оказывает влияния на клубни. Для этого раскладывали клубни по сортирующей поверхности и изменяли частоту и амплитуду вибрации в сторону увеличения и уменьшения от определенной теоретически (амплитуда – $A = 3 \text{ мм}$, частота $\nu = 9,6 \text{ Гц}$). Вращение валов при этом отсутствовало. С помощью видеосъемки определяли момент начала отрыва клубней от поверхности вибророторов при увеличении амплитуды и частоты вибрации и их значения, при которых вибрационное действие на клубни не проявляется.

На следующем этапе провели опыты по определению рационального уровня значений параметров вибрации и угловой скорости вращения вибророторов с условием устойчивого перемещения вороха и определения верхнего уровня подачи.

В опытах исследовали устойчивость продольного перемещения вороха в безотрывном режиме и вероятность его сгруживания при заданных значениях подачи. Также исследовали траектории перемещения клубней различных фракций и их боковые перемещения относительно вибророторов. Результаты опыта фикси-

ровали методом цифровой фотосъемки и ее последующей технической обработки. По распечаткам и анализу снимков определяли адекватность теоретических посылок и вносили уточнения. В качестве рационального режима частоты и амплитуды вибрации приняты значения, при которых клубни перемещаются устойчиво по поверхности без подбрасывания с элементами боковой подвижности в пределах калибрующих отверстий между вибророторами. При выявлении бокового перебрасывания клубней на соседние ряды вибророторов будет установлено, что режимы частоты и амплитуды вибрации превышают рациональные значения и приводят к нарушению заданного режима перемещения вороха.

Для проведения экспериментальных исследований устойчивости перемещения был приготовлен вручную картофель сорта «Удача». Состав был следующим: 48 % – клубней крупной фракции, 33 % – средней и 19 % – мелкой фракции.

Клубни равномерно раскладывали на загрузочном конвейере лабораторной установки, затем установили заданные режимы подачи и теоретически определенные режимы вращения и вибрации вибророторов. Затем увеличивали подачу, путем увеличения скорости движения ленты конвейера и наблюдали за поведением клубней. Изменяли скорость вращения и параметры вибрации вибророторов с целью определения влияния на транспортирующую способность и устойчивость перемещения.

Количество рабочих рядов универсальной виброротационной поверхности лабораторного устройства приняли равным шести с установкой зазоров между вибророторами 25 мм.

На следующем этапе опытов определяли полноту сепарации примесей при уточненном в предыдущих опытах верхнем значении подачи клубней, угловой скорости вращения вибророторов и изменении режимов вибрации. Опыты проводили в трехкратной повторности по установленной методике с определением полноты сепарации примесей. В опыте определили рациональную длину участка сепарации, то есть количество рядов вибророторов, которые обеспечат требуемую полноту сепарации не менее 98 % с последующей оценкой повреждения клубней. Условия проведения опытов были следующие: эксперименты проводили в лабо-

ратории, для исследований использовали ворох картофеля сорта «Удача». Количественный состав вороха, приготовленного к исследованию, был следующим: 65 % – клубней, 35 % – примесей в т.ч. 30 % – просеивающейся почвы, 5% растительных примесей при влажности примесей 25%.

Первичная обработка вороха в виде сепарации примесей была выполнена по малооперационному варианту без сортирования, поэтому были установлены максимальные величины подачи и угловой скорости вращения вибророторов при изменении режимов вибрации. Опыты были проведены по соответствующей методике с видеосъемкой процесса обработки и ее визуализацией для анализа.

Для уточнения определенных теоретически режимов вибрации и вращения вибророторов были проведены дополнительные опыты с изменением значений указанных параметров в сторону увеличения и уменьшения. Были реализованы значения частоты и амплитуды вибрации 5...15 Гц; 1,5...4,5 мм соответственно.

При проведении экспериментов использовались следующие способы и средства контроля изменения факторов и параметра оптимизации.

Угловая скорость вращения вала вибропривода и валов с вибророторами контролировалась с помощью тахометра ТЧ – 10 – Р, амплитуда – с помощью стрелочного индикатора перемещения рисунок 3.1 и 3.2.

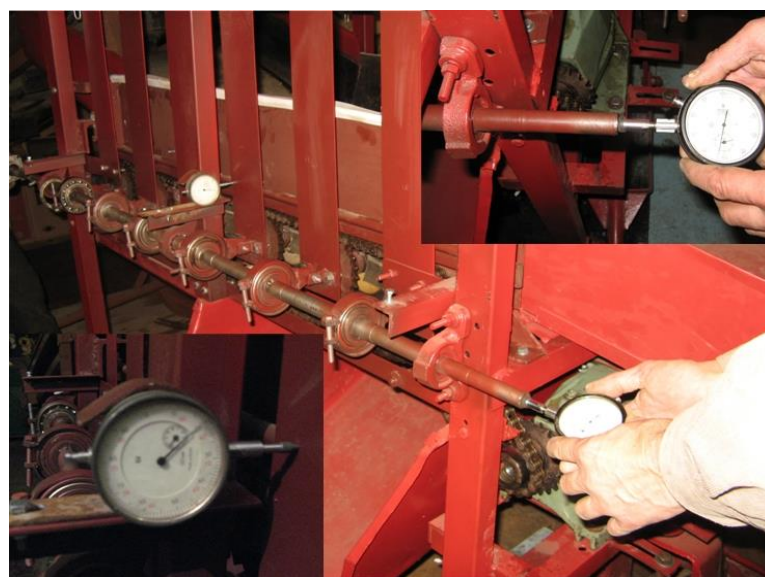


Рисунок 3.1 – Измерение угловой скорости вращения вала вибропривода (частоты вибрации) и амплитуды вибрации

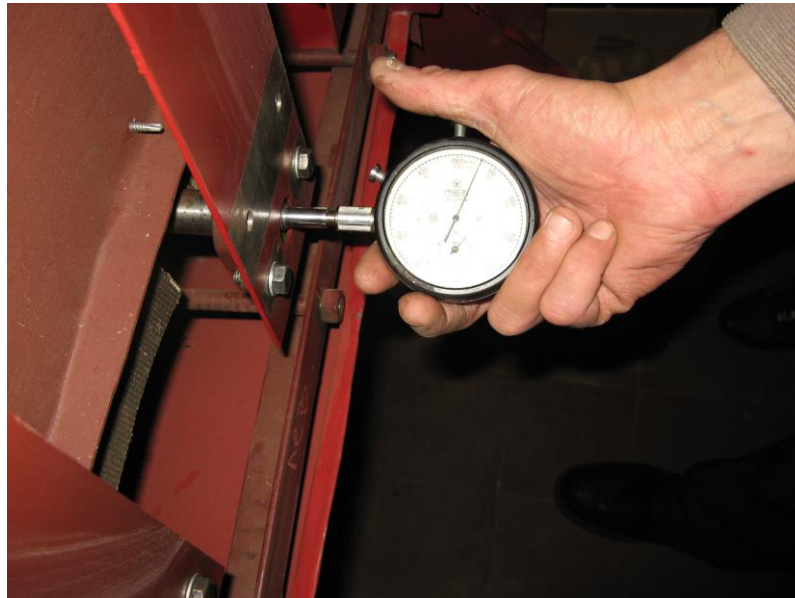


Рисунок 3.2 – Измерение угловой скорости вращения валов с вибророторами

Скорость движения полотна конвейера определили из [37] в зависимости от требуемых значений подачи – 4...5 кг/с.

$$V = \frac{q \cdot l}{M}, \quad (3.1)$$

где q – подача вороха, кг/с;

M – масса вороха, кг;

l – длина конвейера, на котором размещен ворох, массой M , кг.

Выделенные примеси направлялись в один контейнер, а клубни и невыделенные на сепараторе примеси с клубнями – в другой. Затем выбирали невыделенные, но сепарируемые примеси и взвешивали. Полноту сепарации примесей рассчитывали из по формуле:

$$P = \frac{P_u - P_o}{P_u}, \quad (3.2)$$

где, P_u – масса сепарируемых примесей в исходном ворохе, кг;

P_o – масса невыделенных сепарируемых примесей в обработанном ворохе, кг.

Опыты проводили в трехкратной повторности. Определили рациональную длину участка сепарации, которая обеспечивает не менее 98 % сепарации примесей с последующей оценкой повреждения клубней.

3.2.2. Исследования по ориентированию и сортированию клубней

Исследования были начаты с определения размерно-массовых и статистических характеристик клубней картофеля. Для этих целей в «Сельхозартели «Колхоз Маяк» из вороха несортированного картофеля сорта «Удача» была взята проба с таким расчетом, чтобы в ней было не менее 50 штук клубней каждой фракции. Согласно агротехнических требований [41] клубни разделяются на фракции по массе: мелкая 25 – 50 гр, средняя 51 – 80 гр, крупная – свыше 81 гр. Для определения размерно-массовых характеристик, каждый клубень, взятый из пробы, взвешивали с точностью до 1 гр на электронных весах МК – 15,2 – ТН - 21 и измеряли штангенциркулем ширину, толщину, и длину с точностью до 1 мм. Значения размерно-массовых характеристик клубней заносили в таблицы и ряды, затем обрабатывали методом математической статистики на персональной ЭВМ по стандартной программе пошаговой множественной регрессии.

Количество рабочих рядов универсальной виброротационной сортировки приняли равным шести. Три ряда предусматривали настроить на выделение мелкой фракции путем установки зазоров 35 мм. Такое же количество рядов планировали установить для выделения средней фракции, клубней массой до 80 гр с увеличением зазоров между вибророторами до 44 мм. Крупная фракция должна перемещаться вибророторами в специальную емкость. В данном случае будет выполнена операционная схема доработки картофеля путем сортирования клубней на фракции после первичной сепарации примесей.

На первом этапе провели лабораторные опыты с целью исследования частоты вибрации, которая приводит к боковой виброподвижности клубней в пределах калибрующих отверстий и ускорению их ориентирования.

Исследования ориентирования клубней провели методом видеозаписи процесса. В предшествующих опытах были получены значения основных параметров виброротационной поверхности, которые обеспечивают устойчивое перемещение клубней и сепарацию примесей. С учетом этих значений установили изменение частоты вибрации в пределах 5; 10; 15 Гц при значении амплитуды 3 мм и угло-

вой скорости вращения вибророторов $\omega_p = 5\text{с}^{-1}$, Подачу вороха на сортирующую поверхность установили в значении $q = 4\text{кг}/\text{с}$ с целью исследования ориентирования клубней при массовом перемещении.

Данные исследования выполнили путем видеозаписи процесса поворота и ориентирования клубней видеокамерой «Nicon D-3100» с комплектом осветительных приборов. Затем выполнили покадровую разбивку видеозаписи на АВМ «Intel Pentium – 4». Время поворота клубней в пределах калибрующего отверстия, т.е. ускорения ориентирования, определили по частотной характеристике видеозаписи камерой «Nicon D-3100», которая записывает и воспроизводит 24 кадра в секунду.

На следующем этапе при постоянных значениях частоты вибрации 9,6 Гц и угловой скорости вращения вибророторов $\omega_p = 5\text{с}^{-1}$ изменяли амплитуду вибрации в пределах 1,5; 3; 4,5 мм. В итоге обосновали значение амплитуды, обеспечивающее ориентирование клубней с заданными значениями подачи $q = 4\text{кг}/\text{с}$.

Данные исследования выполнили путем изучения видеозаписи процесса поворота и ориентирования клубней. Для проведения опытов видеокамеру установили так, чтобы проекция участка сортирования одной фракции разместилась в объективе камеры. Время поворота клубней, определили аналогично предшествующим опытам.

На следующем этапе лабораторных исследований изучали влияние частоты вибрации на процесс сортирования клубней, путем определения коэффициента точности сортирования клубней картофеля по каждой фракции. В качестве основных факторов процесса были приняты: подача вороха картофеля $q = 4\text{кг}/\text{с}$, угловая скорость вращения вибророторов $\omega_p = 5\text{с}^{-1}$ и амплитуда $A = 3\text{мм}$, которые были определены предварительно и приняты в данном опыте без изменений. Подачу картофеля осуществляли с помощью ленточного конвейера, на определенной длине которого укладывали постоянную массу картофеля 50 кг.

Коэффициент точности сортирования клубней согласно ГОСТ Р 51808 – 2001 определяется из выражения:

$$K = \frac{m_i}{m} \cdot 100 \quad (3.3)$$

где, m_i – масса фракций клубней с отклонениями по качеству и размерам, кг;

m – общая масса клубней в объединенной пробе, кг.

В процессе проведения опытов, отсортированные клубни собирали в отдельные емкости по фракциям. После этого для проверки соответствия выделенных в данную фракцию клубней, требованиям, предъявляемым к данной фракции, определяли их размерно-массовые характеристики и результаты заносили в таблицы. Обработку результатов эксперимента проводили на персональной ЭВМ.

3.2.3. Методика проведения многофакторного эксперимента

Исследование совместного действия основных факторов на процесс сортирования клубней провели в следующем порядке: на первом этапе подготовили три выборки картофельного вороха по 50 кг, соответствующие среднестатистическому составу фракций данного сорта с определением размерно-массовых и статистических характеристик выборок. Затем равномерно разложили клубни на загрузочном конвейере и установили режим подачи соответствующий постановке эксперимента в области максимальной производительности. Далее на экспериментальном устройстве установили значения основных управляемых факторов в рациональных пределах уровня варьирования. Для проведения опытов применили метод планирования многофакторного эксперимента с определением значений основного оценочного критерия и проведением математической обработки и анализа результатов опыта [11, 22, 79].

К основным показателям качества работы машин для сортирования картофеля относят производительность, коэффициент точности сортирования и степень повреждения клубней [29]. При этом сравнительные исследования сортирующих поверхностей различных конструкций [29, 51, 98] показывают, что рабочие органы активного действия (ролики, диски, пружины) обладают значительно большей (до 30 %) удельной производительностью, чем устройства другого принципа действия. Поэтому для проведения многофакторного опыта примем исходные значе-

ния подачи вороха на верхнем уровне, достигнутом аналогичными устройствами активного принципа действия. Необходимо учесть, что по данным [6, 7] для сортировок на основе роторно-пальцевых рабочих органов отмечена возможность повышения производительности и необходимость увеличения точности сортирования.

По данным [6, 32] величина повреждений, наносимых клубням при обработке на сортировках на основе роторно-пальцевых рабочих органов находится в пределах 3 %. Это показатель значительно ниже, чем у роликовых и грохотных. Учитывая эти обстоятельства, примем в качестве основного оценочного критерия точность сортирования клубней. При планировании факторного эксперимента необходимо проанализировать и определить входные параметры процесса сортирования, которые наиболее существенно влияют на качественные показатели виброротационной сортировки. Выбираемые факторы должны быть управляемыми, однозначными, совместимыми, независимыми и точность замеров уровней факторов должна быть выше точности значений параметра оптимизации.

Принимаем в качестве критерия оптимизации точность разделения картофеля на фракции, которая характеризует качество работы устройства и определяется по формуле 3.3

Данный параметр оптимизации удовлетворяет необходимым требованиям: является количественными, т. е. задается числом, имеет множество значений области определения, может быть измерен, является однозначными в статическом смысле, обладает универсальностью и полнотой.

Использование результатов теоретических исследований и предварительных однофакторных экспериментов позволяют обосновать выбор основных управляемых факторов и уровни их варьирования для постановки факторного эксперимента в рациональной области.

После выбора параметра оптимизации принимаем основные факторы, влияющие на процесс сортирования на виброротационной сортировке.

В качестве факторов выбраны следующие:

– подача вороха Q , кг/с;

- угловая скорость вращения вибророторов ω_p, c^{-1} ;
- частота вибрации ν , Гц;

Данные факторы являются управляемыми. Это значит, что мы, выбрав нужное значение фактора, можем поддерживать его постоянным в течение всего опыта.

Значения амплитуды вибрации $A=3\text{мм}$ приняты на основании значений обоснованных в теоретической части диссертации и проверенные в результате проведения однофакторных опытов.

Для данных факторов, уравнение функции отклика выглядит в общем виде:

$$S = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (3.4)$$

где $x_1, \dots, x_k$ – независимые факторы.

Для нашего случая уравнение имеет вид:

$$S = f(q, \omega_p, \nu) \quad (3.5)$$

Объект исследования удобно представить в виде блок-схемы (рисунок 3.3).

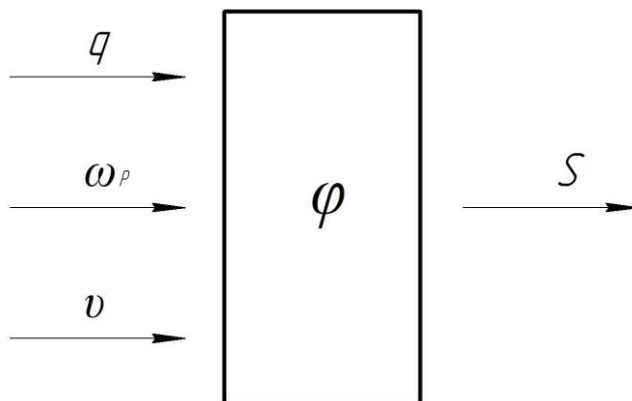


Рисунок – 3.3 Схема представления виброротационной сортировки как объекта исследования, факторов и параметра оптимизации

Стрелка справа изображает численные характеристики цели исследования. Стрелки слева – способы воздействия на объект – факторы или входы блок-схемы.

Области варьирования факторов определяем на основании теоретических и экспериментальных изысканий. Так были приняты ширина рабочей поверхности

– 0,7 м; диапазоны изменения подача клубней приняли равным $q = 3...5 \text{ кг/с}$; угловую скорость вращения вибророторов $\omega_p = 4...6 \text{ с}^{-1}$; частоту вибрации $\nu = 5...15 \text{ Гц}$. После установления областей определения факторов, выбрали интервалы их варьирования и основные уровни факторов.

Число уровней факторов u определим исходя из степени полиномиальной модели функции отклика. В качестве аппроксимирующей кривой принимаем полином второго порядка. В соответствии с этим число уровней факторов равняется $u = 3$.

Приняв число уровней факторов $u = 3$, мы выбираем математический метод планирования эксперимента $n = 2^3 = 8$. В отличие от классического метода $n = 5^3 = 125$, математическая модель, при трехфакторном эксперименте, будет иметь намного меньше опытов, 8 против 125, что позволит значительно упростить вычисления. Используя математический метод планирования эксперимента $n = 2^3 = 8$, мы задаемся целью получить неполное квадратное уравнение, для более точного определения оптимальных параметров.

Вначале для факторов выбраны два уровня, на которых они будут варьироваться в эксперименте – максимальное и минимальное значения, которые будут использоваться в эксперименте. За верхний уровень принят тот, который соответствует большему значению фактора, а за нижний – меньшему.

Основной уровень фактора выбран на основе теоретических исследований, руководствуясь тем, чтобы максимальные и минимальные значения факторов располагались симметрично относительно основных осей.

Для удобства записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных введены кодированные независимые переменные, т. е. выбраны такие условные числовые оси, чтобы верхний уровень каждого фактора соответствовал + 1, нижний соответствовал – 1, а основной – нулю.

В результате данного этапа планирования эксперимента были определены условия эксперимента (таблица 3.1).

Неизвестную функцию отклика аппроксимировали полиномом вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (3.6)$$

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

Таблица 3.1 – Условия эксперимента

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

Факторный эксперимент осуществили с помощью матрицы планирования, в которой использовали кодированные значения факторов.

За исходную точку для построения плана эксперимента принимаем сочетание основных уровней в условии эксперимента.

Для построения модели используем центральный композиционный план второго порядка. Данный план получен достройкой некоторого количества точек к «ядру» ($n = 2^3 = 8$ опытов), образованному линейным планом.

Общее число N опытов центрального композиционного плана определяется из выражения:

$$N = 2^k + 2 \cdot k + n_0, \quad (3.7)$$

где k – число факторов, шт;

n_0 – число опытов в центре плана, шт.

Критерием оптимальности данного плана принята ортогональность. Исходя из данного критерия число опытов в центре плана равно $n_0 = 1$.

Таким образом, общее число опытов равно:

$$N = 2^3 + 2 \cdot 3 + 1 = 15.$$

При получении центрального композиционного плана к полному факторному эксперименту 2^3 добавляется одна нулевая точка (0; 0; 0) и шесть «звездных» точек с координатами $(+\alpha; 0; 0); (-\alpha; 0; 0); (0; +\alpha; 0); (0; -\alpha; 0); (0; 0; +\alpha); (0; 0; -\alpha)$,

где α – величина «звездного» плеча.

Общий вид матрицы центрального композиционного плана приведен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Матрица центрального композиционного плана второго порядка для трех факторов

Содержание Плана	Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y
План типа 2^3	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	y_1
	2	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	y_2
	3	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	y_3
	4	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	y_4
	5	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	y_5
	6	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	y_6
	7	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	y_7
	8	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	y_8
«Звездные» точки	9	+	$+\alpha$	0	0	0	0	0	α^2	0	0	y_9
	10	+	$-\alpha$	0	0	0	0	0	α^2	0	0	y_{10}
	11	+	0	$+\alpha$	0	0	0	0	0	α^2	0	y_{11}
	12	+	0	$-\alpha$	0	0	0	0	0	α^2	0	y_{12}
	13	+	0	0	$+\alpha$	0	0	0	0	0	α^2	y_{13}
	14	+	0	0	$-\alpha$	0	0	0	0	0	α^2	y_{14}
Нулевая Точка	15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{15}

В матрице центрального композиционного плана не все столбцы ортогональны, так как:

$$\sum_{j=1}^N x_{0j} x_{ij}^2 \neq 0, \quad (3.8)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ij}^2 x_{ij}^2 \neq 0, \quad (3.9)$$

В связи с тем, что x_0 всегда равно +1, а $x_{ij}^2 \geq 0$,

где i – номер столбца матрицы;

j – номер опыта.

Для ортогонализации соотношения $\sum_{j=1}^N x_{0j} x_{ij}^2 \neq 0$ преобразованы столбцы – заменены x_i^2 новой переменной x'_i . Новая переменная найдена по выражению

$$x'_i = x_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij}^2}{N} = x_i^2 - \bar{x}_i^2, \quad (3.10)$$

После замены x_i^2 на x'_i , будут равны суммы построчных произведений столбцов

$$\sum_{j=1}^N x_{0j} x'_{ij} = \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 - N \bar{x}_i^2, \quad (3.11)$$

Ортогонализация соотношения $\sum_{j=1}^N x_{ij}^2 x_{ij}^2 \neq 0$ достигнута выбором звездного плеча α . Значения звездного плеча α , вычисленные для различного числа факторов, приведены в таблице 3.3. В нашем случае $\alpha = 1,215$.

Используя вышеуказанное соотношение, найдены переменные x'_1, x'_2, x'_3 :

$$x'_1 = x_1^2 - \frac{\sum_{i=1}^{15} x_{ij}^2}{15} = x_1^2 - \frac{8 + (2 \cdot 1,215)^2}{15} = x_1^2 - 0,73;$$

аналогично:

$$x'_2 = x_2^2 - 0,73;$$

$$x'_3 = x_3^2 - 0,73.$$

Матрица ортогонального планирования для трех факторов представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Матрица ортогонального планирования для трех факторов

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1^2 - 0,73$	$x_2^2 - 0,73$	$x_3^2 - 0,73$	Y
1	+	+	+	+	+	+	+	+0,27	+0,27	+0,27	y_1
2	+	-	+	+	-	-	+	+0,27	+0,27	+0,27	y_2
3	+	+	-	+	-	+	-	+0,27	+0,27	+0,27	y_3
4	+	-	-	+	+	-	-	+0,27	+0,27	+0,27	y_4
5	+	+	+	-	+	-	-	+0,27	+0,27	+0,27	y_5
6	+	-	+	-	-	+	-	+0,27	+0,27	+0,27	y_6
7	+	+	-	-	-	-	+	+0,27	+0,27	+0,27	y_7
8	+	-	-	-	+	+	+	+0,27	+0,27	+0,27	y_8
9	+	+1,215	0	0	0	0	0	+0,746	-0,73	-0,73	y_9
10	+	-1,215	0	0	0	0	0	+0,746	-0,73	-0,73	y_{10}
11	+	0	+1,215	0	0	0	0	-0,73	+0,746	-0,73	y_{11}
12	+	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	+0,746	-0,73	y_{12}
13	+	0	0	+1,215	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,746	y_{13}
14	+	0	0	-1,215	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,746	y_{14}
15	+	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	y_{15}

Реализация опытов в соответствии с данной матрицей планирования с преобразованной квадратичной переменной позволяет построить модель вида:

$$y = b'_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} (x_1^2 - 0,73) + b_{12} (x_2^2 - 0,73) + b_{13} (x_3^2 - 0,73), \quad (3.12)$$

Благодаря ортогональности матрицы коэффициенты регрессии определим независимо друг от друга по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}, \quad (3.13)$$

где x_{ij} – элементы соответствующего столбца матрицы;

y_j – значение параметра оптимизации в j –м опыте.

3.3. Планирование экспериментальных исследований в производственных условиях

Планированием экспериментальных исследований в производственных условиях предусматривалось следующее: определить задачи, очередность и план опытов, установить минимально необходимое число опытов, обеспечить условия их проведения, выбрать критерии оценки и методы математической обработки результатов опытов.

На первом этапе экспериментальных исследований в производственных условиях планировали исследование технологической согласованности и универсальности функционирования участков сепарации примесей и сортирования клубней при выполнении полнооперационной и малооперационной обработки вороха картофеля. В случае несогласованности функционирования последовательных участков универсальной поверхности и низкой надежности при выполнении комплекса технологических процессов, может происходить сгруживание вороха, защемление клубней, снижение производительности и качества операций.

Технологическая согласованность работы участков заключается в обеспечении заданного режима устойчивого перемещения и перехода клубней с участка сепарации примесей на участок сортирования, а также по эффективности обработки картофеля при установке верхних значений подачи.

Проверку устойчивости перемещения и эффективности обработки картофеля планировали исследовать методом видеосъемки процессов сепарации примесей и сортирования на режимах максимальных подач.

Исследования технологической универсальности функционирования участков сепарации примесей и сортирования клубней планировали провести в условиях производственного процесса в хранилище. Для проведения данных исследований необходимо настроить универсальную виброротационную сортировку на соответствующий вариант обработки вороха картофеля. Для этого сепарирующие и калибрующие отверстия щелевой формы настраивали на требуемый вариант об-

работки путем изменения расстояния между соседними вибророторами на одном валу от 20 до 60 мм. По результатам опытов определим показатели качества сепарации, точность сортирования и повреждения клубней.

Технологическую надежность функционирования виброротационной сортировки заключается в способности сохранять установленные рабочие параметры при обработке вороха с значительным содержанием влажных примесей. В качестве основных критериев оценки технологической надежности определяли способность виброротационной рабочей поверхности самоочищаться от налипшей почвы, предотвращать залипание калибрующих отверстий и наматывание растительности, устойчиво транспортировать и рассредотачивать по сортирующей поверхности обрабатываемый ворох без защемления и сгуживания клубней. В качестве воздействующих неблагоприятных факторов приняты: повышенная влажность и содержание почвенных и растительных примесей и комков, значительный объем картофеля с влажной налипшей почвой.

Для проведения указанных опытов выбирали ворох картофеля соответствующий сложным условиям уборки или хранения с содержанием указанных примесей до 40 % при влажности до 35 %.

3.4. Методика экспериментальных исследований в производственных условиях

Проверку согласованности устойчивого перемещения картофеля на участках исследовали методом фотосъемки процессов сепарации примесей и сортирования. Затем определили согласованность участков по обеспечению равнозначной эффективности и качества обработки картофеля в одном проходе при выполнении полнооперационной обработки в условиях хранилища. В качестве оценки согласованности применили методику определения полноты сепарации, точности сортирования и производительности при уровнях подачи вороха $q = 4\text{ кг/с}$. Величину подачи вороха устанавливали путем изменения производительности подающего конвейера оборудованного приемным бункером.

Исследования технологической универсальности функционирования участков сепарации примесей и сортирования клубней нового устройства провели по разработанной методике. Опыты проводили в производственных условиях.

Малооперационная обработка выполняется при максимально возможной производительности рабочей поверхности, которая должна обеспечить первичную обработку вороха картофеля, поступающего с поля для закладывания на длительное хранение при минимальном повреждении клубней.

Поэтому для проведения данных исследований настраивали универсальную виброротационную сортировку на соответствующий вариант обработки вороха картофеля в хранилище при максимальной подаче 5 кг/с. Для настройки универсальной поверхности на требуемый вариант регулировали размер отверстий для сепарации примесей и сортирования мелкой фракции. Далее определяли показатели качества сепарации, полноту выделения мелкой фракции и повреждаемости клубней.

Показатели качества выполнения технологических процессов определяли в соответствии с ОСТ 10.3.5–87.

Коэффициент точности сортирования клубней каждой фракции определили по формуле (3.3).

Опыты проводили методом фотосъемки и визуального осмотра с последующим определением слоя и количества налипшей почвы на поверхность вибророторов, залипание калибрующих отверстий почвой и нарушение размера отверстий, наматывание растительности на валы, защемления и сгруживания клубней.

Опыты по оценке повреждений клубней при обработке на универсальной виброротационной поверхности проводили по установленной методике. Сначала выкопали вручную и без повреждений доставили с поля 150 кг картофеля, затем клубни укладывали на загрузочный конвейер по 50 кг для трехкратного проведения опытов. После проведения опытов подсчитали общее количество клубней в каждой пробе и разделяли их на поврежденные и неповрежденные. В день проведения опытов к поврежденным относили клубни:

– с содранной кожурой, от $1/4$ до $1/2$ поверхности;

- с содранной кожурой более 1/2 поверхности;
- с вырванной мякотью глубиной более 5 мм;
- с трещинами длиной более 20 мм;
- с разрезами и подрезами;
- раздавленные.

После первичного обследования картофель закладывали на 10 – дневное хранение для определения повреждения мякоти путем разреза их на дольки толщиной 3 мм, перпендикулярно продольной оси клубней. К поврежденным относили клубни, у которых повреждение мякоти было на глубину более 5 мм. Расчет степени повреждений выполняли по формуле:

$$P_{\pi} = \frac{P_c \cdot 100}{P_k}, \quad (3.15)$$

где, P_{π} – относительное количество поврежденных клубней, %;

P_c – количество поврежденных клубней, шт;

P_k – количество клубней в пробе, шт.

3.5. Объект исследований

Для проведения экспериментальных исследований была разработана конструкторская документация и изготовлен экспериментальный образец универсальной сортировки [26]. Он представляет собой мобильное устройство, которое может использоваться автономно или в составе технологической линии для послеуборочной доработки, предпосадочной или товарной подготовки картофеля. Общий вид экспериментального устройства представлен на рисунке 3.4.

Универсальная рабочая поверхность сортировки состоит из вибророторов, насаженных на валы и вращающихся в одном направлении с одинаковой угловой скоростью при этом одновременно вибрирующих в поперечном направлении. Валы с вибророторами установлены горизонтально на индивидуальных упругих подвесах, которые закреплены на раме. Каждый ряд вибророторов относительно предыдущего установлен в шахматном порядке без перекрытия.



Рисунок 3.4 – Общий вид экспериментальной виброротационной сортировки

Виброротаторы изготовлены из резиновой смеси марки «18 – 510» по техническому регламенту «Тульского завода РТИ», методом прессования и вулканизации в пресс-форме.

Они могут перемещаться вдоль вала для изменения размера калибрующих отверстий щелевой формы. Конструкция сортирующей поверхности соответствует параметрам, определенным в результате теоретических исследований и частично принятых на основании ранее проведенных исследований.

Сепарирующие и калибрующие щелевые отверстия образованы между боковыми гранями соседних виброротаторов и регулируются в пределах от 20...60 мм путем перемещения виброротаторов вдоль вала. Поэтому конструкция новой рабочей поверхности дает возможность настройки на выделение любой фракции и сепарацию примесей.

В связи с низким потреблением мощности на привод виброротаторов в конструкции сортировки установлен один мотор-редуктор мощностью 1,5 кВт для вращения валов и подающего конвейера и частотно-регулируемый привод мощностью 0,7 кВт для вращения вала вибропривода. Изменение скорости движения загрузочного конвейера и угловой скорости виброротаторов осуществляется путем замены ведущих звездочек на мотор-редукторе.

Экспериментальное устройство легко перемещается усилием одного рабочего по твердой площадке благодаря низкой материалоемкости и установке на опорные колеса, а также рациональной компоновки привода.

Виброротационная сортировка позволяет выполнять полнооперационную и малооперационную обработку вороха картофеля путем изменения параметров рабочей поверхности без замены другой.

Для проведения экспериментальных исследований в производственных условиях, виброротационную сортировку включили в состав мобильной технологической линии для послеуборочной доработки картофеля (рисунок 3.5)



1 – подающий конвейер; 2 – виброротационная сортировка;
3 – инспекционный стол

Рисунок 3.5 – Виброротационная сортировка в составе технологической линии доработки картофеля в хранилище

Линия для доработки картофеля включает в себя следующие технологические агрегаты: подающий конвейер, виброротационную сортировку и инспекционный стол с затаривающими устройствами.

Для проведения опытов были использованы следующие приборы и оборудование:

- платформенные весы ТВ – S – 200 – А3;
- весы МК – 15,2 – ТН - 21;
- штангенциркуль;
- секундомер;
- индикатор перемещения стрелочный;
- тахометр ТЧ – 10 – Р;
- калькулятор Cittyzen SRP – 145;
- угломер УБ – Х4 ТУ50 – 1837;
- видеокамера «Nicon D – 3100»;
- микрокалькулятор «Электроника Э – 71»;
- персональный компьютер, АВМ;
- киловаттметр самопишущий 1 – 1348;
- набор инструмента слесарного;
- комплект сменных звездочек для цепных передач.

Выводы:

- в результате исследований разработана программа проведения экспериментальных и исследований в лабораторных и производственных условиях;
- разработана методика проведения экспериментов в лабораторных и производственных условиях с оценкой основных технологических показателей виброротационной сортировки;
- определены основные факторы, влияющие на процесс сортирования: подача вороха Q , кг/с; угловая скорость вращения вибророторов ω_p , c^{-1} ; частота вибрации ν , Гц.
- разработана блок-схема функционирования виброротационной сортировки и определены условия проведения полнофакторного эксперимента;
- изготовлен экспериментальный образец универсальной виброротационной сортировки.

4. Результаты экспериментальных исследований виброротационной сортировки

4.1. Лабораторные исследования устойчивости перемещения клубней и эффективности сепарации примесей

Поисковые исследования устойчивости перемещения клубней, эффективности сепарации примесей и определения длины участка сепарации выполнили в специализированной лаборатории Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для проведения однофакторного опыта отключили кинематический привод вибророторов и они не вращались, а только вибрировали с изменением частоты и амплитуды. В результате поочередной установки параметров вибрации по принятой методике получили следующие результаты. При установке теоретически определенной амплитуды $A=3\text{ мм}$ и частоты вибрации $\nu=9,6\text{ Гц}$ клубни находились в состоянии виброподвижности в пределах калибрующих отверстий без отрыва и перебрасывания. При увеличении значений более расчетных амплитуды до $A=4,5\text{ мм}$ и частоты вибрации до $\nu=13\text{ Гц}$ клубни начинали терять контакт с рабочей поверхностью и хаотически перебрасывались через вибророторы на соседние калибрующие отверстия. Аналогичное поведение клубней наблюдалось и при значении амплитуды $A=3\text{ мм}$ и частоте свыше $\nu=15\text{ Гц}$. Затем определили нижние пределы показателей вибрации, при которых подвижность клубней минимальна и вибрационное воздействие на клубни ослаблено. Были получены следующие значения амплитуда $A=1,5\text{ мм}$ и частота $\nu=7\text{ Гц}$. Аналогичные данные получены и при значении амплитуды $A=3\text{ мм}$ и частоте до $\nu=5\text{ Гц}$. При установке данных значений подвижность клубней была минимальной. Так как при проведении опытов вращение валов с вибророторами отсутствовало, то полученные значения необходимо в дальнейшем уточнить.

В результате опыта определили крайние значения параметров вибрации в различном сочетании: амплитуда $A=1,5...4,5\text{ мм}$ и частота $\nu=5...15\text{ Гц}$. В каче-

стве рациональных приняли значения амплитуды вибрации $A=3\text{мм}$ и частоты $\nu=9,6\text{Гц}$. Установка теоретически определенных значений амплитуды обеспечила микроподвижность клубней в пределах калибрующих отверстий без отрыва и перебрасывания на соседние.

В дальнейшем с учетом полученных значений параметров амплитуды и частоты вибрации провели опыты по определению рациональных значений угловой скорости вращения вибророторов. Критерием оценки и выбора рациональной угловой скорости вращения вибророторов было условие обеспечения устойчивого перемещения клубней без подбрасывания при заданной производительности.

По распечаткам и анализу снимков выявили, что при установке теоретически определенных значений $\omega_p = 5\text{ с}^{-1}$, параметров вибрации частоты $\nu=9,6\text{Гц}$, амплитуды $A=3\text{мм}$ и подаче вороха $q=4\text{кг/с}$ было обеспечено устойчивое перемещение клубней по поверхности без подбрасывания и сгуживания с элементами виброподвижности клубней в пределах калибрующих отверстий. Устойчивое перемещение клубней также наблюдалось и при увеличении подачи в пределах до $q=5\text{кг/с}$.

Опыт продолжили в поисковом варианте путем увеличения частоты вращения вибророторов до $\omega_p = 6\text{ с}^{-1}$ при прежних значениях частоты и амплитуды вибрации и подаче вороха до $q=5\text{кг/с}$, что соответствует производительности 18 т/ч. В этом случае было установлено устойчивое перемещение клубней и вороха в целом без сгуживания.

На следующем этапе были проведены дополнительные поисковые опыты для определения рациональных пределов угловой скорости вращения вибророторов и ее влияние на транспортирующую способность рабочей поверхности. При установке нижнего уровня режима вращения $\omega_p = 4\text{ с}^{-1}$ и параметров вибрации частота $\nu=9,6\text{Гц}$, амплитуда $A=3\text{мм}$ при подаче $q=5\text{кг/с}$ было выявлено неустойчивое перемещение вороха и наблюдались явления сгуживания клубней. Аналогичные явления наблюдались при увеличении амплитуды и частоты вибра-

ции до $A=4,5\text{мм}$ и $\nu=13\text{Гц}$ соответственно при постоянном значении $\omega_p = 4\text{ с}^{-1}$ (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Фрагменты проведения опытов (сгруживание)

Установка верхнего уровня режимов вращения вибророторов в пределах $\omega_p = 6-7\text{ с}^{-1}$ при параметрах вибрации: частоте $\nu=9,6\text{Гц}$ и амплитуде $A=3\text{мм}$ приводили к перемещению клубней с частичным отрывом от поверхности. При тех же значениях $\omega_p = 6-7\text{ с}^{-1}$ и увеличении частоты вибрации до $\nu=13\text{Гц}$, амплитуды до $A=4,5\text{мм}$ наблюдалось еще более неустойчивое перемещение клубней с элементами бокового и продольного перебрасывания на соседние вибророторы рисунок 4.2.



Рисунок 4.2 – Фрагменты проведения опытов (с отрывом клубней)

В итоге установили, что определяющим фактором, обеспечивающим устойчивое перемещение клубней по виброротационной поверхности является угловая скорость вращения вибророторов. Вибрация обеспечивают рассредоточения вороха до однослойного состояния и виброподвижности клубней и оказывают второстепенное значение на процесс перемещения клубней по поверхности. При увеличении частоты и амплитуды вибрации за рациональные пределы в сочетании с увеличением угловой скорости вращения вибророторов наблюдается хаотическое продольное перемещение с боковыми и прямолинейными подбрасываниями клубней.

Поэтому на основании опыта можно принять верхний уровень угловой скорости вращения вибророторов $\omega_p = 5,5 \text{ с}^{-1}$ и подачи вороха равный $q = 5 \text{ кг/с}$.

На следующем этапе опытов определили полноту сепарации примесей при верхнем значении подачи $q = 5 \text{ кг/с}$, угловой скорости вращения вибророторов $\omega_p = 5,5 \text{ с}^{-1}$ и изменении режимов вибрации. Значения были приняты с учетом того, что они обеспечивают устойчивое перемещение клубней и необходимо определить влияние параметров вибрации на эффективность сепарации примесей. В опыте определили рациональную длину участка сепарации, обеспечивающую полноту сепарации не менее 98 % с последующей оценкой повреждения клубней.

Результаты статистической обработки материалов эксперимента обработаны в соответствии с методикой полевых опытов по [25, 46] и представлены в таблице 4.1.

Для нахождения возможного максимума значений полноты сепарации примесей, были реализованы дополнительные опыты в сочетании амплитуда $A = 3 \text{ мм}$ и частоты $\nu = 9,6 \dots 12 \text{ Гц}$. По полученным данным были построены графики зависимость полноты сепарации примесей от амплитуды и частоты вибрации (рисунок 4.2).

Таблица 4.1 – Полнота выделения примесей при изменении режимов вибрации

Показатели	Амплитуда, мм – 1,5		
Частота, Гц	5	9,6	15
Выделение мелких примесей в среднем, %	85,4	89,1	93,4
Показатели	Амплитуда, мм – 3		
Частота, Гц	5	9,6	15
Выделение мелких примесей в среднем, %	88,2	96,5	94,3
Показатели	Амплитуда, мм – 4,5		
Частота, Гц	5	9,6	13
Выделение мелких примесей в среднем, %	92,4	95,3	86,6

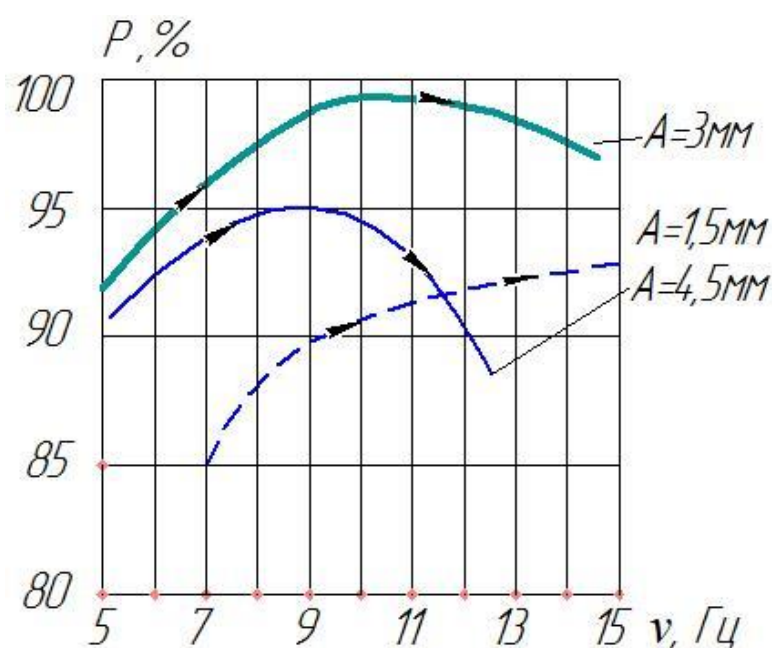


Рисунок 4.2 – Зависимость полноты сепарации примесей от амплитуды и частоты вибрации

Анализ таблицы и графиков показывает на явно выраженные максимумы полноты сепарации примесей в области параметров вибрации амплитуды $A=3\text{ мм}$ и частоты $\nu=9,5\ldots 11\text{ Гц}$, что в основном согласуется с результатами опытов по

устойчивому перемещению клубней с возможностью увеличения частоты до $\nu = 10 \text{Гц}$.

При амплитуде $A = 1,5 \text{мм}$ и частоте вибрации $\nu = 7...15 \text{Гц}$ наблюдалось незначительное увеличение интенсивности действия вибророторов на картофельный ворох, поэтому полнота сепарации примесей изменялась незначительно и составила 93,4 %.

При амплитуде $A = 3 \text{мм}$ и увеличении частоты вибрации $\nu = 5...15 \text{Гц}$ максимальная полнота сепарации примесей составила 98 % при частоте вибрации соответствующей $\nu = 9,5...10 \text{Гц}$, при дальнейшем увеличении частоты вибрации наблюдалась тенденция к снижению.

При амплитуде $A = 4,5 \text{мм}$ и изменении частоты вибрации $\nu = 5...13 \text{Гц}$ наблюдалось незначительное увеличение полноты сепарации примесей до 95,3 % при частоте вибрации $\nu = 8,5...9 \text{Гц}$. В дальнейшем наблюдалось снижение полноты сепарации примесей, что можно связать с началом перемещения части примесей в полувзвешенном состоянии.

Исследования показали адекватность теоретическим предпосылкам по определению параметров вибрации. Также были внесены уточнения параметров вибрации на основе анализа перемещения картофеля и результатов процесса сепарации примесей.

В результате проведенных опытов в лабораторных условиях установлены рациональные параметры и режимы работы виброротационной поверхности, обеспечивающие устойчивое перемещение клубней и сепарацию примесей $P = 98$ %: количество рядов вибророторов для сепарации – 3, угловая скорость вращения вибророторов $\omega_p = 5,5 \text{с}^{-1}$ режим подачи вороха картофеля до $q = 5 \text{кг/с}$, амплитуда и частота вибрации $A = 3 \text{мм}$ и $\nu = 10 \text{Гц}$ соответственно, ширина рабочей поверхности 0,7 м, повреждения клубней – 1,5 %.

4.2. Определение размерно-массовых и статистических характеристик картофеля

В соответствии с программой и методикой экспериментальных исследований виброротационной сортировки определили размерно-массовые характеристики клубней сорта «Удача». Для определения указанных параметров клубней была взята проба из вороха картофеля, предназначенного для проведения опытов. В объеме выборки массой 46,2 кг оказался 651 клубень.

После проведения поштучного обмера и взвешивания состав выборки был следующим: клубней мелкой фракции массой 25 – 50 г было 178 штук, средней 51...80 г – 247, крупной более 81 г – 226. Общая масса пробы составила 46,2кг, из них – 7,4 кг мелкой фракции, 15,7 – средней, 23,1 – крупной. После обработки полученных данных на ПЭВМ по программе пошаговой множественной регрессии получили статистические характеристики размеров клубней по толщине, ширине и длине приведенные в таблице 4.2

Таблица 4.2 – Статистические характеристики клубней картофеля

Размерный признак клубня	Фракция		
	Мелкая	Средняя	Крупная
Толщина X (с), мм o (X), мм	34,12 3,54	43,6 3,4	53,21 4,9
Ширина X (с), мм o (X), мм	42,3 3,79	48,7 4,1	56,4 5,04
Длина X (с), мм o (X), мм	45,4 4,41	55,9 4,8	64,8 8,32
Априорная вероятность	0,197	0,359	0,439

Согласно агротехнических требований, основным критерием оценки разделения клубней на фракции является их масса.

Сортирование картофеля осуществляется по одному или сочетанию нескольких линейных размеров клубня, поэтому размерно-массовые характеристики необходимо представить в виде функциональной зависимости:

$$m = f(a, b, c) \quad (4.1)$$

Для установления линейной зависимости между массой клубня и его размерами используем метод наименьших квадратов, в результате математических расчетов получены уравнения регрессии в следующем виде:

$$m_m = 0,64a + 0,91b + 0,75c - 57; i = 0,935 \quad (4.2)$$

$$m_c = 0,82a + 0,86b + 1,27c - 89,5; i = 0,868 \quad (4.3)$$

$$m_k = 1,75a + 2,03b + 2,84c - 210,89; i = 0,978 \quad (4.4)$$

4.3. Лабораторные исследования ориентирования и сортирования клубней

Изучение процесса ориентирования клубней с помощью видеосъемки показало, что в зависимости от режима вибрации наблюдаются различные траектории перемещения клубней.

Фрагменты видеозаписи ориентирования клубней до и после периода их перемещения на поверхности одного ряда вибророторов при определенной теоретически угловой скорости вращения $\omega_p = 5 \text{ с}^{-1}$, амплитуде вибрации $A = 3 \text{ мм}$ и частоте, полученной в предыдущих опытах, $\nu = 10 \text{ Гц}$, подаче $q = 4 \text{ кг/с}$, представлены на рисунке 4.3 а) и б).



а)



б)

а) начало ориентирования при подъеме клубня вибророторами; б) завершение ориентирования над калибрующим отверстием

Рисунок 4.3 – Ориентирование клубней вибророторами

Видеозапись траектории перемещения клубней относительно калибрующего отверстия показала, что при частоте колебаний $\nu = 10 \text{ Гц}$, амплитуде $A = 3 \text{ мм}$ и угловой скорости вращения $\omega_p = 5 \text{ с}^{-1}$ наблюдалось ускорение ориентирования клубней с момента начала их взаимодействия с вибророторами и дальнейшего перемещения.

При угловой скорости вращения $\omega_p = 5 \text{ с}^{-1}$, амплитуде вибрации $A = 3 \text{ мм}$ и частоте $\nu = 5 \text{ Гц}$ и практически не выявлен эффект ориентирования клубней в пределах калибрующего отверстия между вибророторами.

При угловой скорости вращения $\omega_p = 5 \text{ с}^{-1}$, амплитуде вибрации $A = 3 \text{ мм}$ и частоте $\nu = 15 \text{ Гц}$ выявлена значительная боковая подвижность клубней с элементами частичного отрыва и снижения эффекта ориентирования (рисунок 4.4).

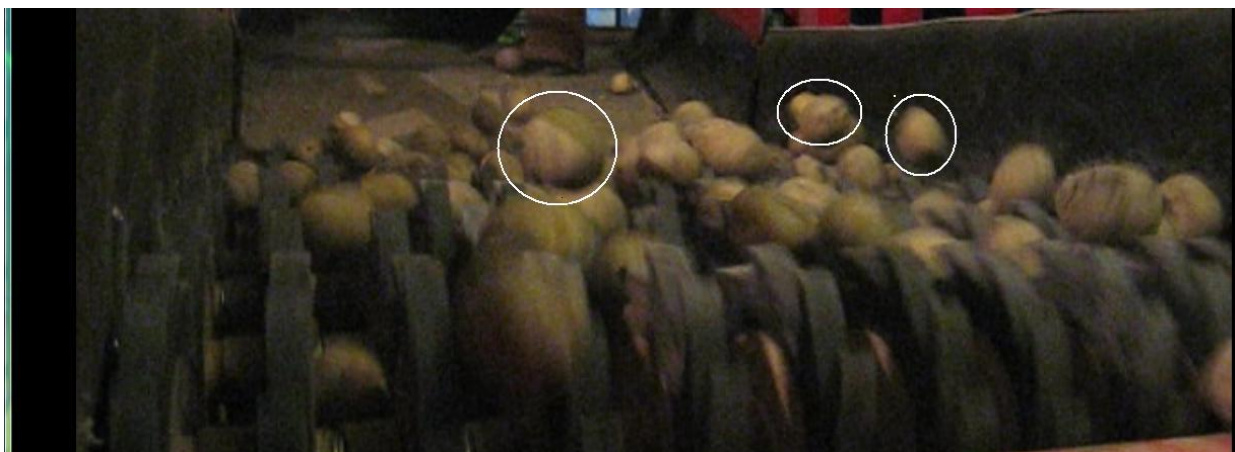


Рисунок 4.4 –Отрыв клубней от рабочей поверхности
и ослабление эффекта ориентирования

На следующем этапе лабораторных опытов исследовали процесс подвижности и ускорения ориентирования клубней при изменении амплитуды вибрации в пределах $A=1,5...4,5\text{ мм}$ и постоянных значениях угловой скорости вращения вибророторов $\omega_p = 5\text{ с}^{-1}$ и частоте $\nu = 10\text{ Гц}$.

Анализ изображения показал, что при установке расчетных значений амплитуды вибрации и угловой скорости вращения вибророторов происходит поворот клубней и ускоренное ориентирование в отверстие. Съемки ориентирования были проведены за период с начала момента взаимодействия клубней с вибророторами (рисунок 4.5) до расположения их над калибрующим отверстием.



Рисунок 4.5 – Ориентирование клубней вследствие вибрации

После обработки и анализа снимков эксперимента подтвердили значение амплитуды колебаний вибророторов $A=3\text{мм}$, которая приводит к направленному ориентирования клубней в калибрующие отверстия при ограниченном боковом перемещении.

При амплитуде колебаний $A=1,5\text{мм}$ ослаблен эффект подвижности и практически не выявлено направленное ориентирования клубней в пределах калибрующего отверстия между вибророторами.

При амплитуде колебаний $A=4,5\text{мм}$ выявлена повышенная активность и перебрасывание отдельных клубней за пределы калибрующего отверстия и снижение эффекта ориентирования.

В результате обработки видеоматериалов установлено, что определяющим действием, влияющим на подвижность и ускорение ориентирования клубней, является не амплитуда или частота колебаний отдельно взятые, а их совместное действие. Наибольшая эффективность этого действия установлена на определенном уровне (амплитуда $A=3\text{мм}$, частота $\nu=10\text{Гц}$) сочетания режимов вибрации для принятой конструкции вибророторов, которая определена в результате теоретических исследований.

Также установлено, что вибрационное воздействие на перемещаемый картофель снижает силы внутреннего трения между клубнями в ворохе. Этим обеспечивается более интенсивное рассредоточение вороха и большая подвижность клубней при взаимодействии с калибрующими отверстиями.

В качестве критерия оптимизации определили точность разделения картофеля на фракции из (3.3).

При проведении экспериментов установлено, что точность сортирования зависит от частоты и амплитуды вибрации от среднего уровня, который определен в предшествующих опытах.

При постоянных значениях угловой скорости вращения вибророторов $\omega_p=5\text{с}^{-1}$ и вибрационном воздействии с амплитудой $A=3\text{мм}$ и частотой $\nu=8...12\text{Гц}$, клубни имели относительную подвижность в пределах калибрующе-

го отверстия без перемещения на соседние. При этом точность сортирования составила 92 % при частоте около $\nu = 10 \text{ Гц}$ (рисунок 4.6).

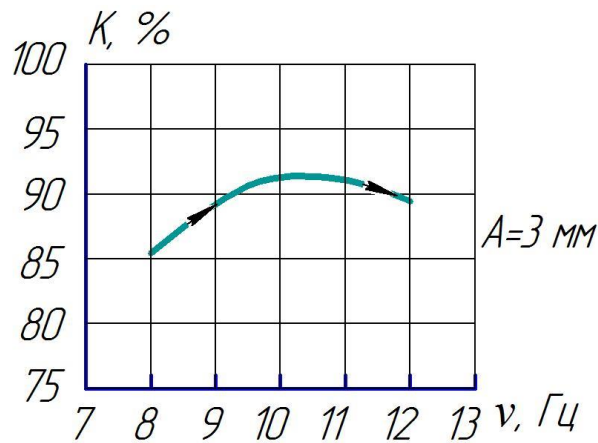


Рисунок 4.6 – Зависимость точности сортирования от частоты вибрации

В результате проведенных исследований установлены параметры и режим работы виброротационной сортировки, которые обеспечили максимально возможную эффективность ориентирования клубней и точность сортирования: угловая скорость вращения вибророторов $\omega_p = 5 \text{ с}^{-1}$, амплитуда вибрации $A = 3 \text{ мм}$, частота $\nu = 10 \text{ Гц}$, обеспечивающие направленное ориентирование клубней в отверстия и показатели точности сортирования 92 % при подаче $q = 4 \text{ кг/с}$.

4.4. Анализ результатов полнофакторного эксперимента по определению точности сортирования

В соответствии с программой экспериментальных исследований провели опыты по оптимизации параметров и режимов работы виброротационной сортировки методом полнофакторного эксперимента [69, 76].

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 $K_\phi = 1,21$.

Эксперименты были реализованы по схеме центрального композиционного плана второго порядка. Критерием оптимальности данного плана была принята ортогональность. Матрица планирования факторного эксперимента типа 2^3 представлена в пункте 3.2 диссертационной работы.

Опыты позволяют определить зависимость точности сортирования картофеля от подачи клубней q , угловой скорости вращения вибророторов ω_p и частоты вибрации ν . Сочетания данных факторов при проведении опытов определены в процессе планирования экспериментальных исследований и представлены в матрице планирования факторного эксперимента (см. таблицу 3.6).

На основании плана эксперимента и по результатам его проведения составлена и заполнена рабочая таблица условий и результатов проведения экспериментов (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Рабочая таблица условий и результатов проведения экспериментов

Номер опыта	$q, \text{кг/с}$	$\omega_p, \text{с}^{-1}$	$\nu, \text{Гц}$	%
1	5	6	15	62,2
2	3	6	15	66,7
3	5	4	15	64,5
4	3	4	15	78,6
5	5	6	5	68,2
6	3	6	5	78,3
7	5	4	5	66,4
8	3	4	5	68,5
9	6	5	10	77,8
10	2	5	10	82,5
11	4	7	10	78,4
12	4	3	10	85,6
13	4	5	20	83,5
14	4	5	0	80,5
15	4	5	10	89,7

Таким образом, уравнение 3.12 принимает вид:

$$y = 91,46 - 3,3x_1 - 1,04x_2 - 0,51x_3 + 0,2x_1x_2 - 0,8x_1x_3 - 3,2x_2x_3 - 8,2x_1^2 - 6,9x_2^2 - 6,9x_3^2 \quad (4.5)$$

Данное уравнение описывает зависимость точности сортирования клубней от управляемых факторов: x_1 – подачи картофеля, x_2 – угловой скорости вращения вибророторов, x_3 – частоты вибрации.

Для принятия модели к исследованию проверили ее адекватность с помощью критерия Фишера.

Для проверки адекватности модели вычислили дисперсию адекватности S_{ad}^2

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N - (k + 1)} \sum_{u=1}^n (y - \bar{y}_u)^2, \quad (4.6)$$

где N – число опытов ($N=15$);

k – число факторов ($k=3$);

$y - \bar{y}_u$ – разница между полученным и заданным оптимальным значением.

$$S_{ad}^2 = \frac{97,57}{15 - (3 + 1)} = 7,5.$$

Критерий Фишера определяется по формуле:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F_T, \quad (4.7)$$

где $F_T = 19,2$ – табличное значение критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости.

$$F_p = \frac{7,5^2}{7,09} = 7,945.$$

Так как $F_p < F_T$ следовательно делаем вывод об адекватности модели

$$y = 91,46 - 3,3x_1 - 1,04x_2 - 0,51x_3 + 0,2x_1x_2 - 0,8x_1x_3 - 3,2x_2x_3 - 8,2x_1^2 - 6,9x_2^2 - 6,9x_3^2$$

Результаты проверки на адекватность полученной модели показали, что найденное уравнение регрессии адекватно описывает искомую зависимость.

Первичный анализ модели позволяет сделать следующие выводы: наибольшее влияние на точность сортирования оказывает величина подачи клубней, затем угловая скорость вращения вибророторов и частота вибрации.

Уравнение составлено в кодированной форме, и его необходимо привести к натуральному виду. Для этого подставим в данное уравнение вместо переменных x_1, x_2, x_3 выражения:

$$\begin{aligned}x_1 &= \frac{q - x_0}{\Delta x} = \frac{q - 4}{1}; \\x_2 &= \frac{\omega_p - x_0}{\Delta x} = \frac{\omega_p - 5}{1}; \\x_3 &= \frac{\nu - x_0}{\Delta x} = \frac{\nu - 10}{5}.\end{aligned}$$

Окончательное уравнение в натуральной форме примет вид

$$\begin{aligned}y &= 73,56\omega_p + 9,258\nu + 62,9q - 6,9\omega_p^2 - 0,276\nu^2 - 8,2q^2 - \\&\quad - 0,64\omega_p\nu + 0,2\omega_pq - 0,16\nu q - 254,82\end{aligned}$$

Данное уравнение описывает зависимость точности сортирования от управляемых факторов: x_1 – подачи вороха, x_2 – угловой скорости вращения вибророторов, x_3 – частоты вибрации.

Для изучения математической модели процесса сортирования клубней картофеля, составим уравнения регрессии для каждой пары взаимодействующих факторов:

1. $x_1 x_2$

$$y = 91,46 - 3,3x_1 - 1,04x_2 + 0,2x_1x_2 - 8,2x_1^2 - 6,9x_2^2;$$

2. $x_1 x_3$

$$y = 91,46 - 3,3x_1 - 0,51x_3 - 0,8x_1x_3 - 8,2x_1^2 - 6,9x_3^2;$$

3. $x_2 x_3$

$$y = 91,46 - 1,04x_2 - 0,51x_3 - 3,2x_2x_3 - 6,9x_2^2 - 6,9x_3^2.$$

Для более подробного анализа данных уравнений необходимо построить графики зависимостей, которые представляют собой поверхности отклика, и с помощью которых можно определить оптимальные режимы работы виброротационной сортировки:

Построим график зависимости x_1 от x_2 (рисунок 4.7)

$$y = 91,46 - 3,3x_1 - 1,04x_2 + 0,2x_1x_2 - 8,2x_1^2 - 6,9x_2^2$$

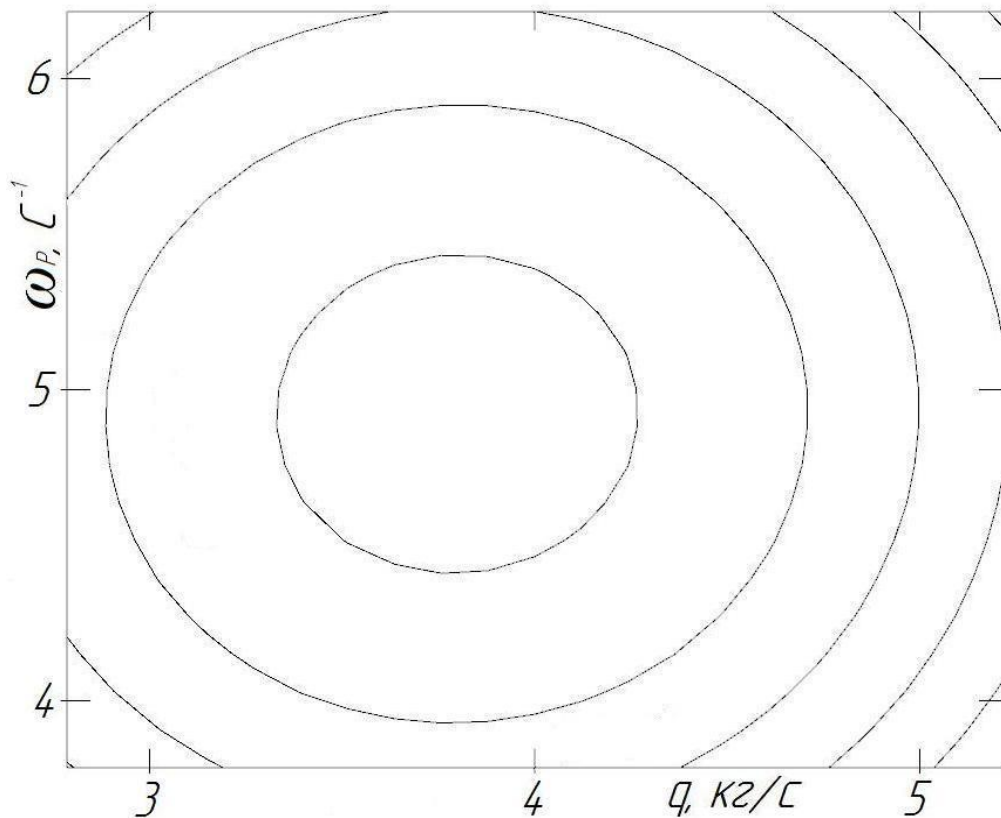
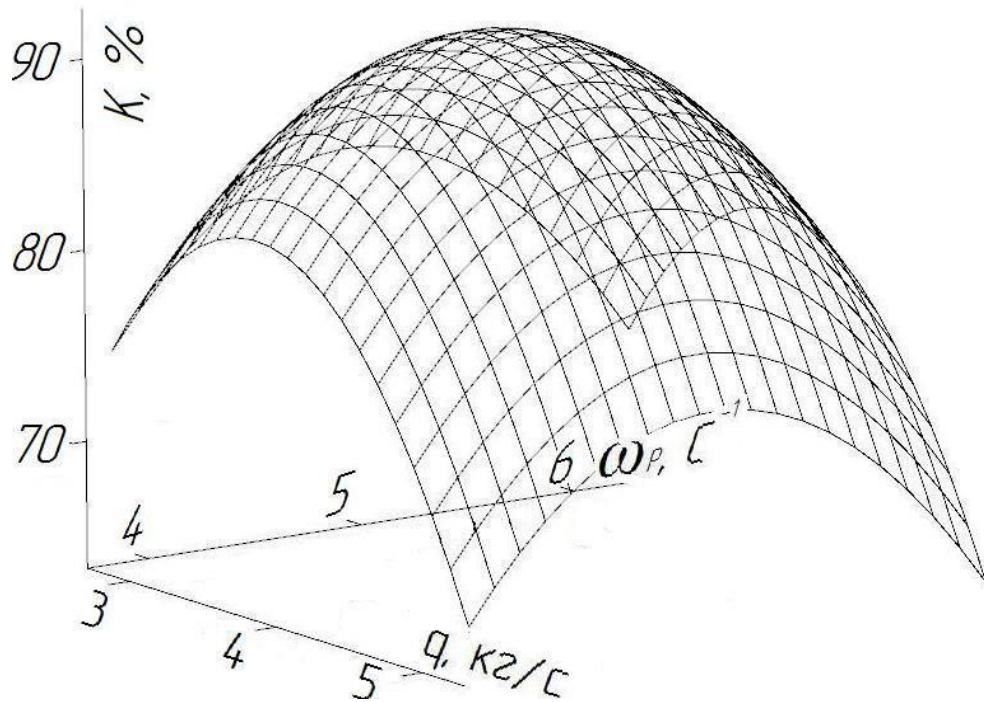


Рисунок 4.7 – Поверхность отклика и ее контурный график, характеризующие величину точности сортирования картофеля K при изменении факторов ω_p и q при постоянной величине фактора $\nu = 10 \Gamma \text{ц}$

Построим график зависимости x_1 от x_3 (рисунок 4.8)

$$y = 91,46 - 3,3 \cdot x_1 - 0,51 \cdot x_3 - 0,8 \cdot x_1 \cdot x_3 - 8,2 \cdot x_1^2 - 6,9 \cdot x_3^2$$

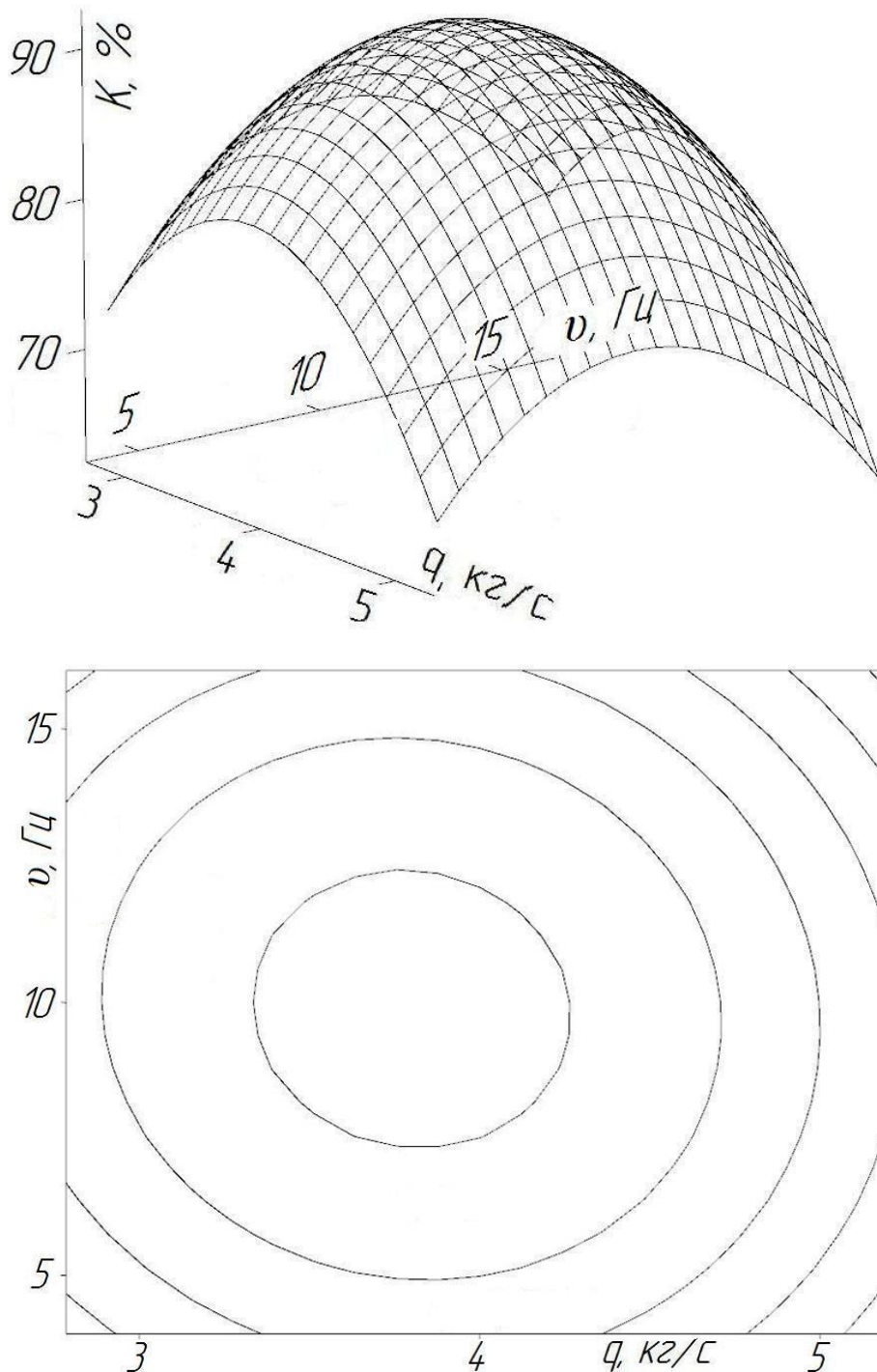


Рисунок 4.8 – Поверхность отклика и ее контурный график, характеризующие величину точности сортирования картофеля K при изменении факторов v и q при постоянной величине фактора $\omega_p = 5c^{-1}$

Построим график зависимости x_2 от x_3 (рисунок 4.9)

$$y = 91,46 - 1,04 \cdot x_2 - 0,51 \cdot x_3 - 3,2 \cdot x_2 \cdot x_3 - 6,9 \cdot x_2^2 - 6,9 \cdot x_3^2$$

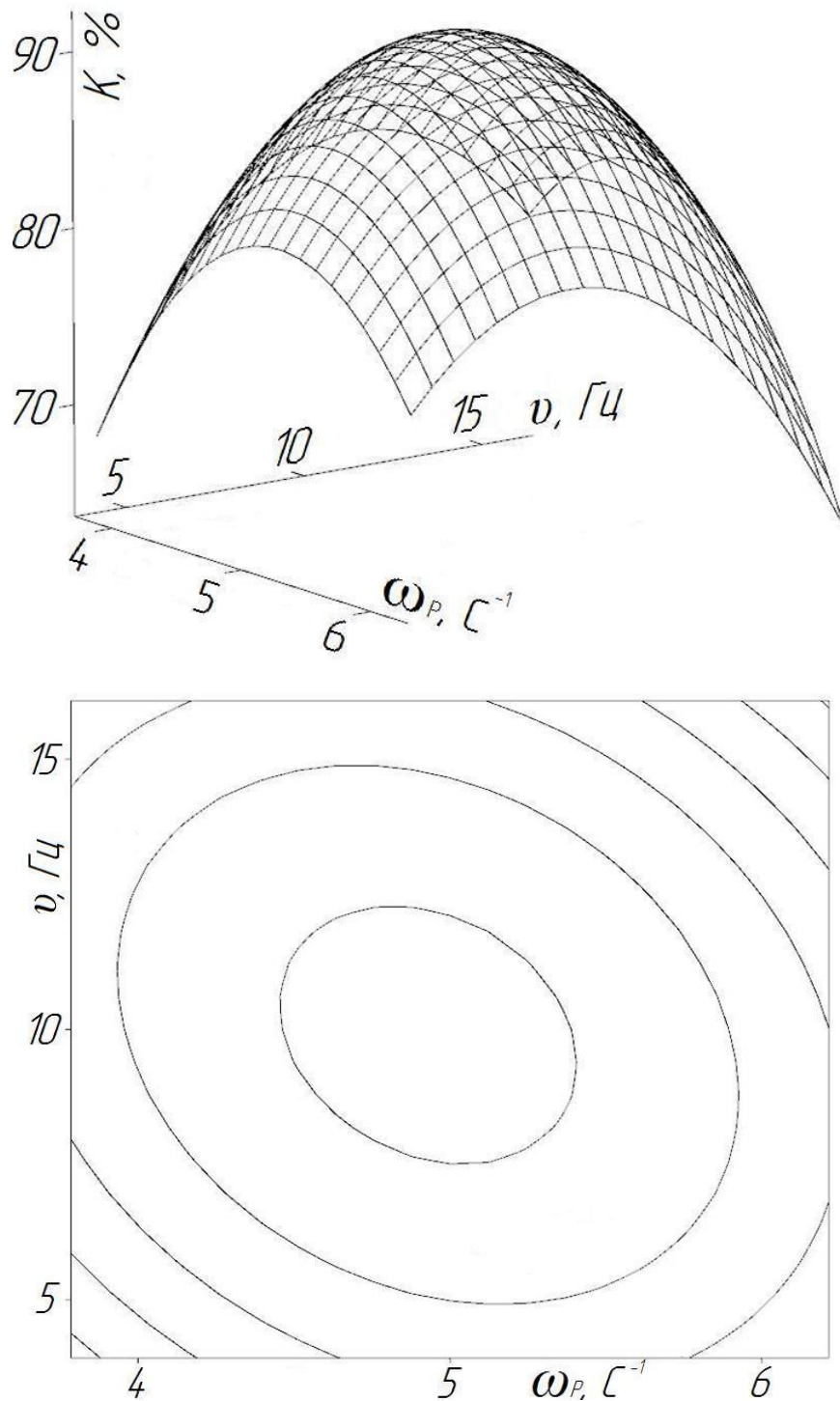


Рисунок 4.9 – Поверхность отклика и ее контурный график, характеризующие величину точности сортирования картофеля K при изменении факторов ν и ω_p при постоянной величине фактора $q = 4\kappa z/c$

Анализ уравнения и поверхностей отклика показывает, что максимальная точность сортирования ($K=92\%$) обеспечивается при использовании уровней факторов, что для подачи q составляет 3,8 кг/с, для угловой скорости вращения вибророторов $\omega_p = 4,9 \text{ с}^{-1}$, для частоты вибрации $\nu = 8 \text{ Гц}$.

Полученные результаты подтверждают теоретические предпосылки о том, что точность сортирования клубней на виброротационной сортировке определяется следующими основными факторами: подачей клубней – q , угловой скоростью вращения вибророторов – ω_p и частотой вибрации – ν .

В результате проведенных лабораторных исследований, анализа математической модели процесса сортирования клубней и решения задачи нелинейного программирования определены рациональные параметры и режимы работы виброротационной сортировки:

- угловая скорость вращения вибророторов – $\omega_p = 4,9 \text{ с}^{-1}$;
- амплитуда вибрации – $A = 3 \text{ мм}$;
- частота вибрации – $\nu = 9,8 \text{ Гц}$;
- подача вороха картофеля на сортирующую поверхность в пределах $q = 3,8 \text{ кг/с}$;
- установленная ширина рабочей поверхности – 0,7 м;
- общий коэффициент точности сортирования картофеля – $K = 92\%$;
- ширина калибрующих отверстий для разделения картофеля сорта «Удача» на фракции; мелкую – 35 мм, среднюю – 44 мм.

4.5. Результаты исследований в производственных условиях

Исследования экспериментального устройства с универсальной рабочей поверхностью провели на производственной базе Сельхозартели «Колхоз «Маяк»» Калужской области в период с осени 2013 года по март 2014 года по методике изложенной в разделе 3.4.

Опыты по проверке согласованности и устойчивости перемещения клубней по участкам сепарации примесей и сортирования провели при выполнении полнооперационной обработки вороха картофеля. Для этого настроили универсальную сортировку на выполнение операций: подачу вороха, сепарацию примесей и сортирование клубней. В опытах установили значение подачи вороха картофеля $q = 3,8 \text{ кг/с}$, угловую скорость вращения вибророторов $\omega_p = 4,9 \text{ с}^{-1}$, частоту вибрации $\nu = 9,8 \text{ Гц}$ при амплитуде $A = 3 \text{ мм}$. Технологическую работу участков оценили по обеспечению режима устойчивого перемещения и перехода вороха картофеля с участка сепарации примесей на участок сортирования без сгруживания.

Исследования видеозаписи процесса показывают, что при установке заданных режимов подачи, вращения и вибрации вибророторов выявлено устойчивое перемещение и эффективная обработка вороха картофеля без сгруживания.

Затем оценили согласованность участков на предмет обеспечения эффективности процессов сепарации примесей и сортирования клубней в одном проходе при полнооперационной обработке вороха картофеля. Для оценки согласованности функционирования участков определили полноту сепарации примесей на первом участке, которая составила 95 % и точность сортирования равная 92 % на втором.

Исследования универсальности функционирования нового устройства провели после технологической перенастройки поверхности на малооперационную схему обработки. Для этого три ряда роторов настроили на сепарацию примесей путем установки зазоров 25 мм. Такое же количество рядов настроили для выделения мелких клубней массой до 50 г с зазорами между вибророторами 35 мм при установке подачи вороха $q = 5 \text{ кг/с}$, угловой скорости вращения вибророторов $\omega_p = 5,5 \text{ с}^{-1}$, частоты вибрации $\nu = 10 \text{ Гц}$, амплитуду вибрации $A = 3 \text{ мм}$, подачу $q = 5 \text{ кг/с}$.

В результате проведения опыта определили полноту сепарации примесей, которая составила 98 % и полноту выделения мелких клубней на уровне 94 % при минимальном значении повреждаемости клубней до 1,5 %.

Проведенные исследования показали, что при выполнении первого и второго варианта технологических схем обработки вороха картофеля на верхних уровнях значений подачи $q = 3,8 \dots 5 \text{ кг/с}$, ($13,7 \dots 18 \text{ т/ч}$), сепарирующая и сортирующие поверхности функционировали согласованно, т.е. без сгуживания и защемления обрабатываемых клубней с качественным выполнением процессов.

На следующем этапе провели оценку технологической надежности функционирования виброротационной сортировки. В качестве воздействующих неблагоприятных факторов приняты: повышенная влажность и содержание почвенных и растительных примесей и комков, значительный объем картофеля с влажной, налипшей почвой.

Для проведения указанных опытов выбирали ворох картофеля соответствующий сложным условиям уборки или хранения с содержанием указанных примесей до 40 % при влажности до 35 % (рисунок 4.10).



Рисунок – 4.10 Состояние вороха в сложных условиях хранения

В результате оценки технологической надежности установили способность вибророторов самоочищаться от налипшей почвы и предотвращать залипание калибрующих отверстий при прохождении в них клубней.

В ходе проведения обработки вороха не наблюдалось наматывание растительности на валы благодаря устойчивому транспортированию картофеля и крупных растительных примесей. Обрабатываемый ворох интенсивно рассредоточивался вибророторами без защемления и сгуживания клубней (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Фрагмент работы виброротационной поверхности
в сложных условиях

Была выявлена эффективная способность нового устройства сохранять установленные рабочие параметры калибрующих отверстий при обработке вороха с значительным содержанием влажных примесей, а также при технологических перенастройках.

После обработки 340 тонн вороха картофеля на виброротационной сортировке, рабочие органы сохранили полную работоспособность и установленные параметры сепарирующих и калибрующих отверстий.

Налипание почвы на пальцах вибророторов было минимальным до 1 мм, вследствие ее отделения при вибрации пальцеобразных выступов вибророторов и от взаимодействия с обрабатываемым ворохом. Налипание почвы также отсутствовало и на стенках калибрующих отверстий, что объясняется исключением силового действия стенок щелевого отверстия на клубни при их прохождении в от-

верстия. Этими фактами подтверждается правильность теоретических предпосылок к выбору конструкции пальцеобразных вибророторов сортирующей поверхности.

Опыты для проверки повреждаемости клубней картофеля при обработке на универсальной виброротационной поверхности проводили согласно методике пункт 3.4 диссертационной работы. В результате оценки общие повреждения клубней не превысили 1,5 %.

Выводы:

- в результате экспериментальных исследований получены зависимости и математическая модель связывающая точность сортирования картофеля, угловую скорость вращения вибророторов, частоту вибрации и подачу исходного материала с возможностью обоснования их рациональных значений.

- результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические предпосылки по изысканию параметров универсального сортирующего устройства, а также позволили обосновать и предложить для практического применения параметры устройства: угловую скорость вращения вибророторов $\omega_p = 4,9...5,5 \text{ c}^{-1}$, частоту вибрации $\nu = 9,8...11 \text{ Гц}$, амплитуду вибрации $A = 3 \text{ мм}$, подачу $q = 3,8...5 \text{ кг/с}$.

- в результате производственных испытаний установили возможность выполнения полнооперационной схемы обработки вороха с достижением полноты сепарации 95 % и точности сортирования 92 % при подаче $q = 3,8 \text{ кг/с}$ (13,7 т/ч), и малооперационной схемы с полнотой сепарации 98 % при более высокой подаче $q = 5 \text{ кг/с}$ (18 т/ч) и установке верхнего уровня угловой скорости вращения вибророторов $\omega_p = 5,5 \text{ c}^{-1}$. Поэтому для малооперационной схемы обработки рекомендована угловая скорость вращения вибророторов $\omega_p = 5,5 \text{ c}^{-1}$, для полнооперационной $\omega_p = 4,9 \text{ c}^{-1}$.

- изменение размеров калибрующих зазоров рекомендовано в пределах 20...60 мм, которые позволили эффективно и универсально выполнять процессы

сепарации примесей и сортирования на фракции на одной поверхности и реализовать принятые схемы послеуборочной обработки картофеля.

– при обработке вороха повышенной влажности до 35 % и содержании почвенных и растительных примесей до 40 % устройство обеспечило предотвращение налипания почвы и забивания комками калибрующих отверстий, что позволило сохранить установленные параметры калибрующих зазоров в процессе эксплуатации.

– результаты исследований в производственных условиях показали, что виброротационная сортировка обладает высокой эффективностью, качеством и согласованностью функционирования, что позволяет обрабатывать ворох картофеля, полученный в экстремальных условиях уборки или при хранении в буртах и необорудованных хранилищах.

– для достижения требуемой точности сортирования клубней в производственных условиях необходимо устанавливать размер ширины калибрующих отверстий щелевой формы в соответствии с результатами определения границ фракций подлежащего к обработке вороха картофеля при разделении клубней по толщине. Для сортирования картофеля сорта «Удача» необходимо установить размер ширины щелевого отверстия для выделения мелкой фракции – 35 мм, средней – 44 мм.

– универсальная виброротационная сортировка позволяет выполнять обработку вороха картофеля по нескольким технологическим схемам в т.ч. с полным циклом операций или малооперационную при минимальном повреждении клубней закладываемых на длительное хранение, не более 1,5 %.

– технологическая гибкость экспериментального устройства достигается путем изменения регулируемых рабочих параметров универсальной поверхности в широких пределах, что в сочетании с высокой эффективностью функционирования обеспечит достаточный уровень адаптированности к производственным условиям различных хозяйств.

5. Экономическая эффективность использования виброротационной сортировки

Повышение урожайности картофеля и снижение потерь в период хранения напрямую связано с технологией и оборудованием, применяемым для послеуборочной доработки. Снижение себестоимости и повышение конкурентоспособности производства картофеля в России и в Калужской области в частности, сдерживается отсутствием недорогого и эффективного оборудования, которое можно использовать в различных почвенно-климатических и хозяйственных условиях. Разработанная виброротационная сортировка должна обеспечить повышение качественных показателей выполняемых технологических процессов и одновременно обеспечить снижение показателей материало-энергоёмкости.

Для оценки экономической эффективности использования универсальной виброротационной сортировки провели экспериментальные исследования в производственных условиях и определили основные эксплуатационные показатели.

Определение эксплуатационных показателей работы экспериментального устройства провели в соответствии с ГОСТ 24055 – 88 в составе технологической линии для доработки вороха картофеля в условиях хранилища и с помощью видеосъёмки, хронометражных визуальных наблюдений, а также сбора, анализа и взвешивания выделенных фракций, примесей и других замеров. По результатам замеров определили: общую сменную и удельную производительность, полноту сепарации примесей, точность сортирования, надёжность технологических процессов сепарации и сортирования, точность регулировки эксплуатационных размеров и повреждаемость клубней. Также определили основное время работы устройства, сменное время (включающее основное время работы), время на ежедневное техническое обслуживание, подготовку и окончание работ, время настройки машины, устранения неисправностей, простой из-за технологических причин и переездов, определили материало-энергоёмкости устройства.

На основании полученных хронометражных данных рассчитывали сменную и эксплуатационную производительность технологической линии, коэффициент технической готовности, использования технологического, сменного и эксплуатационного времени, надежности технологического процесса.

Проведенные в хозяйственных условиях исследования показали, что экспериментальная виброротационная сортировка в составе технологической линии обеспечивает производительность обработки картофеля в пределах 13,7...18 т/ч.

Особенностью экспериментальной виброротационной сортировки является то, что она может использоваться как для обработки небольших объемов картофеля в фермерских хозяйствах до 100 тонн, так и работать в составе технологической цепочки в масштабах крупных хозяйств до 1000 тонн. При этом качественные показатели технологического процесса нового оборудования, такие как полнота сепарации примесей и точность сортирования клубней, значительно выше при минимальном уровне повреждений.

Показатели качества выполнения технологических процессов сепарации примесей и сортирования клубней определили при обработке вороха картофеля, который брали из закрома картофелехранилища.

Для более точного определения производительности, взвешивали количество картофеля, поступившего после обработки вороха в контейнеры за одну минуту работы линии. Значение производительности универсальной поверхности определили по формуле:

$$Q = \frac{(M_1 + M_2 + M_n)}{t}, \quad (5.1)$$

где M_1 , M_2 , M_n – масса картофеля в первом, втором и дополнительных контейнерах, кг;

t – время работы, ч.

Результаты производственных испытаний представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Эксплуатационно-технологические показатели виброротационной сортировки

Наименование показателя	Значение показателя
Производительность за час основного времени, т/ч	13,7...18
Коэффициент готовности	0,9
Коэффициент использования технологического времени	0,97
Коэффициент использования сменного времени	0,81
Коэффициент надежности технологического процесса	0,89
Масса экспериментального модуля, кг	780
Потребляемая мощность, кВт/ч	2,2
Удельная металлоемкость, кг/(т/ч)	21
Удельная энергоемкость, (кВт/ч)/(т/ч)	0,098
Повреждаемость клубней, %	1...1,5

Расчет экономической эффективности экспериментальной виброротационной сортировки произведен на основании данных, полученных в результате разработки конструкторской документации, изготовления и испытаний, проведенных в хозяйственных условиях на базе хозяйства сельхозартель «Колхоз Маяк» Калужской области, Перемышльского района в 2013 – 2014 годах.

Предприятие предоставило производственные площади для проведения испытаний. В присутствии представителя предприятия с помощью линии для послеуборочной доработки картофеля, включающей в себя подающий конвейер с приемным бункером, виброротационную сортировку и инспекционный стол с затаривающим устройством была произведена послеуборочная доработка картофеля. Испытания проводили на картофеле сортов «Удача» и «Кураж». Количественный состав вороха, приготовленного к исследованию, был следующим:

65 % – клубней, 35 % – примесей в т.ч. 30 % – просеивающейся почвы, 5 % – растительных примесей, влажность примесей – 25 %.

Рабочая ширина сортирующей поверхности – 0,7 м, производительность сортировки – 13,7...18 т/ч, полнота выделения сепарируемых примесей составила 98 %, общий коэффициент точности сортирования составил 92 %. Повреждения клубней 1,5 %. Масса устройства 780 кг, габаритные размеры: длина – 1,7 м; ширина – 1,1 м; высота – 1,65 м.

Расчет экономической эффективности применения виброротационной сортировки в составе технологической линии произвели в сравнении с аналогичной сортировальной машиной С6РК15 [42, 75,] в аналогичных условиях. Она оснащена рабочими органами сортировального пункта КСП – 15 В и является его производной.

Показатели сравнительной экономической эффективности использования нового и базового устройства представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Показатели сравнительной экономической эффективности использования экспериментальной виброротационной сортировки

Показатели	Расчетная формула	Результат
Снижение удельных эксплуатационных затрат, %	$\frac{C_{уд.баз.} - C_{уд.нов.}}{C_{уд.баз.}} 100$	18,59
Снижение удельных капиталовложений, %	$\frac{K_{уд.баз.} - K_{уд.нов.}}{K_{уд.баз.}} 100$	51,45
Снижение приведенных затрат, %	$\frac{З_{пр.баз.} - З_{пр.нов.}}{З_{пр.баз.}} 100$	23,11
Снижение удельной металлоемкости, %	$\frac{M_{уд.баз.} - M_{уд.нов.}}{M_{уд.баз.}} 100$	37,93
Снижение удельной энергоемкости, %	$\frac{\mathcal{E}_{уд.баз.} - \mathcal{E}_{уд.нов.}}{\mathcal{E}_{уд.баз.}} 100$	14,28
Годовой экономический эффект на одну сортировку, руб.	$\mathcal{E}_{год} = З_{пр.баз.} - З_{пр.нов.}$	129967,5
Интегральный экономический эффект на одну сортировку, руб.	$\mathcal{E}_{инт} = \mathcal{E}_{год} T_{эф}$	935766

Исходные данные к проведению сравнительного экономического анализа представлены в Приложении Б диссертационной работы. При расчетах использована методика определения экономической эффективности по ГОСТ 24055 – 88.

Важным критерием оценки оборудования для послеуборочной доработки картофеля является степень повреждения свежееубранных клубней. Поэтому были проведены испытания виброротационной сортировки при доработке свежееубранного картофеля, предназначенного для осенней реализации. К поврежденным клубням относили клубни с механическими повреждениями (порезы, вырывы, трещины, вмятины тканей глубиной более 5 мм и длиной более 10 мм) согласно ГОСТ Р 51808 – 2001. Доработка была выполнена по полнооперационной схеме. В результате оценки повреждения составили 2...3 %.

Выводы:

- производственные испытания сортировки в составе технологической линии показали, что основные эксплуатационно-технологические характеристики экспериментального устройства обеспечивают качественное выполнение всех технологических процессов и свидетельствуют о достижении поставленной в работе цели исследований на повышение эффективности сортирования, снижение материалоемкости устройства и повреждаемости обрабатываемых клубней;

- выполненные в настоящей работе теоретические и экспериментальные исследования направлены на решение одной из важных задач – снижение количества потребляемой электроэнергии на выполнение технологических операций при послеуборочной доработке вороха картофеля путем создания универсальной виброротационной сортировки, обладающей низким энергопотреблением;

- 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 %.

Заключение

1. В результате анализа процессов и устройств для сепарации примесей и сортирования клубней и обобщения результатов научных исследований определено актуальное направление разработки перспективных сортировок ротационного типа на основе нового виброкинематического принципа функционирования рабочих органов.

2. В результате исследований устройств и процессов послеуборочной доработки картофеля предложены конструктивные параметры и технологическая схема нового рабочего органа и универсальной виброротационной сортировки для сепарации примесей и сортирования клубней (патент на изобретение № 2489067 «УСТАНОВКА ДЛЯ ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОДООВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ (ВАРИАНТЫ)» от 10 августа 2013г.) Устройство реализует малооперационную или полнооперационную технологии обработки картофеля путем управления виброкинематическими параметрами.

3. В результате теоретических исследований определены параметры угловой скорости вращения вибророторов $\omega_p = 5\text{с}^{-1}$, частоты их вибрации $\nu = 9,6\text{Гц}$ и амплитуды $A = 3\text{мм}$, позволяющие совместить кинематическое и вибрационное действие рабочих органов и реализовать интенсивное ориентирование клубней в калибрующие отверстия для повышения эффективности сортирования.

4. Исследованы силовые характеристики вибрационного взаимодействия вибророторов с клубнями, получены аналитические зависимости и минимальная величина изменения геометрии калибрующего отверстия $\delta_{\text{дин}} = 1,025 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Определена допустимая скорость соударения клубня с вибророторами $V_k = 1,32 \text{ м/с}$, при которой не происходит повреждение клубней при силовом контакте $W = 0,00004 \text{ Дж}$, что меньше допустимых пределов $W = 0,078 - 0,18 \text{ Дж}$.

5. Изготовлен экспериментальный образец универсальной виброротационной сортировки на основе результатов теоретических исследований и материалов

изложенных в патенте, обеспечивающий реализацию гипотезы о виброкинематическом принципе процесса сортирования клубней.

6. 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, что согласуется с результатами теоретических исследований (расхождение не превышает 5 %).

7. Производственные опыты подтвердили универсальность сортировки в процессе полнооперационной и малооперационной обработки вороха с показателями: полнота сепарации примесей $P = 95...98 \%$ и точность сортирования $K = 90...92 \%$ с производительностью 13,7...18 т/ч при повреждении клубней не более 1,5 %. Для малооперационной схемы рекомендованы значения: $\omega_p = 5,5 \text{ с}^{-1}$ и $q = 5 \text{ кг/с}$ (18 т/ч). Для полнооперационной $\omega_p = 4,9 \text{ с}^{-1}$ и $q = 3,8 \text{ кг/с}$ (13,7 т/ч). Пределы регулирования калибрующих зазоров от 20 до 60 мм. Применение вибрации повысило качество выполнения технологических процессов на 17...24 % по сравнению с использованием данной сортировки без вибрации.

8. 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 литературы

1. ГОСТ Р 51808 – 2001. Картофель свежий продовольственный, реализуемый в розничной торговой сети. – Введ. 2003 – 01 – 01. – М.: Изд-во Госстандарт России, 2001. – 6 с.
2. ГОСТ Р 53136 – 2008. Картофель семенной. – Введ. 2010 – 01 – 01. – М.: Изд-во Госстандарт России, 2008. – 18 с.
3. ГОСТ 24055 – 88. Методы эксплуатационно – технологической оценки. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 3 с.
4. ГОСТ 23728 – 88. Техника сельскохозяйственная. Основные положения и показатели экономической оценки. – Введ. 1989. – 01 – 01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 3 с.
5. Алакин В.М. Исследование работы роторно-пальцевой комбинированной поверхности для отделения примесей и калибрования картофеля / В.М. Алакин, Н.В. Шабуров // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства в Нечерноземной зоне России. Сборник научных трудов. Выпуск 65. – СПб.: НИПТИМЭСХ НЗ РФ, 1995. – С. 50 – 57.
6. 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.
7. Алакин В.М. Параметры и режимы работы роторно-пальцевой сепарирующе-калибрующей поверхности, повышающие эффективность обработки вороха картофеля: дис. ...канд. тех. наук: 05.20.01 / Алакин Виктор Михайлович. – СПб – Пушкин., 1996. – 184 с.
8. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины / М.П. Александров. – М.: Высшая школа, 1979. – 560 с.
9. Алакин В.М. Расчет и испытание универсального картофелесортировального модуля. Методическое пособие / В.М. Алакин, С.А. Плахов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 28 с.

10. Бергмант А. Ф. Краткий курс математического анализа для ВТУЗОВ / А.Ф. Бергмант, И.Г. Араманович. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
11. Болдин А.П. Основы научных исследований и УНИРС. Учебное пособие. / А.П. Болдин, В.А. Максимов. – М.: Московский автомобильно-дорожный институт, 2002. – 276 с.
12. Бронштейн И.М. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И.М. Бронштейн, К.А. Семедяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
13. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах. 8 – е изд. перераб. / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон. – М.: Наука. 1984. – 483 с.
14. Босой Е. С. Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин: Учебник для сельскохозяйственного машиностроения / Е.С. Босой; под. ред. Е.С. Босого. – М.: Машиностроение, 1977. – 568 с.
15. Волосевич П.Н. Совершенствование технологического процесса и технических средств калибрования клубней картофеля: дис. ... доктора. тех. наук: 05.20.01 / Петр Николаевич Волосевич. – Мичуринск–наукоград, 2011. – 294 с.
16. Верещагин Н.И. Уборка картофеля в сложных условиях / Н.И. Верещагин, К.А. Пшеченков, В.С. Герасимов. – М.: Колос, 1983. – 208 с.
17. Вибрации в технике: Справочник В 6 – ти т. / Под ред. Э.Э. Лавендела. Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение. – Т. 4. – 1981. – 509 с.
18. Гандбарян Д. Обоснование параметров и режимов работы картофелесортировки барабанного типа: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.01 /Давуд Гандбарян. – М., 2006. – 22 с.
19. Горячкин В.П. Собрание сочинений / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1968. – Т. 1 – 3.
20. Дунаев П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 496 с.
21. Диденко М.Д. Машины для уборки овощей / М.Д. Диденко, В.А. Хвостов, В.П. Медведев. – М.: Машиностроение, 1973. – 199 с.

22. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
23. Емельянов П.А. Основы теории ориентирования тел сельскохозяйственных материалов техническими средствами / П.А. Емельянов. – М.: Информагротех, 2001. – 67 с.
24. Ерохин М.Н. Проектирование и расчет подъемно-транспортных машин сельскохозяйственного назначения / М.Н. Ерохин, А.В. Карп, Н.А. Выскребенцев и др.; под ред. М.Н. Ерохина и А.В. Карпа. – М.: Колосс. – 1999. – 228 с.
25. Завалишин Ф.С. Методы исследований по механизации сельскохозяйственного производства / Ф.С. Завалишин, М.Г. Мацнев. – М.: Колос, 1972. – 231 с.
26. Ипатов, М.И. Организация и планирование машиностроительного производства / М. И. Ипатов [и др.]; под ред. М.И. Ипатова, В.И. Постникова, М.К. Захаровой. – М.: Высшая школа, 1988. – 367 с.
27. Колчин Н.Н. Вступление России в ВТО: проблемы и перспективы российского картофелеводства / Н.Н. Колчин, К.А. Пшеченков, С.Б. Прямов // Картофель и овощи. - 2012. - № 7 - С. 2 – 4.
28. 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.
29. Колчин Н.Н. Комплексы машин и оборудования для послеуборочной обработки картофеля и овощей / Н.Н. Колчин. – М.: Машиностроение, 1982. – 268 с.
30. Колчин Н.Н. Механизация работ в хранилищах картофеля и овощей / Н.Н. Колчин. – М.: Агропромиздат, 1985. – 191 с.
31. Колчин Н.Н. Машинное производство картофеля и овощей: технологии и технические средства послеуборочного цикла / Н.Н. Колчин, А.Н. Козин // Достижения науки и техники АПК. – 2004. – № 1. – С. 29 – 34.
32. 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. Ч. 1. – М., 2013. – С. 277 – 280.

33. Колчин Н.Н. Послеуборочный цикл производства картофеля и овощей / Н.Н. Колчин // Сельский механизатор. – 2004. – № 1 – С. 14 – 16.

34. Колчин Н.Н. Теоретические и экспериментальные основы создания комплекса машин для поточной послеуборочной обработки картофеля: дис. ... доктора. тех. наук: 05.20.01 / Николай Николаевич Колчин. – М., 1974. – 317 с.

35. 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.

36. Клецкин М. И. Справочник конструктора сельскохозяйственных машин в 4 т. / Под ред. М. И. Клецкина. – М.: Машиностроение, Т. 1. – 1967. – 722 с.

37. Красников В.В. Подъемно-транспортные машины в сельском хозяйстве. Изд. 2 – е, перераб. и доп. / В.В. Красников. – М.: Колосс, 1973. – 464 с.

38. Каталог продукции ООО «Агротехмаш» / [Электронный ресурс] Сайт ООО «Агротехмаш». – Электрон. дан. – Режим доступа: [Web: http://www.agrotm.ru](http://www.agrotm.ru).

39. Лебедев Л.Я. Послеуборочное отделение почвенных примесей из вороха картофеля на роторно-пальцевом сепараторе / Л.Я. Лебедев, Н.В. Шабуров // Интенсификация технологий и технических средств растениеводства Нечерноземной зоны РСФСР. Сборник научных трудов НИПТИМЭСХ НЗ РСФСР. Выпуск 54. – Л., 1989. – С. 63 – 70.

40. Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов / А.Б. Лурье. – М.: Колос, – 1981. – 362 с.

41. Листопад Г.Е. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Г.Е. Листопад, Г.К. Демидова, Б.Д. Зонов – М.: Агропромиздат, 1986. – 688 с.

42. Лаврухина Н. В. Экономика предприятия. Методическое пособие / Н. В. Лаврухина. – Калуга: Калужский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 100 с.

43. Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. / ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. Т. IV – 16: Сельскохозяйственные машины и оборудование / И.П. Ксенович, Г.П. Варламов, Н.Н. Колчин и др. – М.: Машиностроение, 1998. – 720 с.

44. Мосин В.М. Исследование и обоснование основных параметров универсального ременного рабочего органа для послеуборочной обработки корнеклубнеплодов / В.М. Мосин // Тракторы и сельхозмашины. – 1986. – № 8. – С. 47 – 49.
45. Манпиль Л.И. Определение коэффициента мгновенного трения клубней по рабочей поверхности / Л.И. Манпиль // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1986. – № 12. – С. 28.
46. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рощин. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.
47. Мешкунов В.А. Результаты исследования сепарирующих устройств картофелеуборочных машин / В.А. Мешкунов, А.П. Калинина // Труды НИПТИМЭСХ НЗ РСФСР. Выпуск 18. – Л., 1975. – С. 125 – 133.
48. Мобильные сортировальные машины «ЕККО» серии ЕМ / [Электронный ресурс] Сайт фирмы «Агропак». – Электрон. дан. – Режим доступа: [Web: http://agropak.ru/](http://agropak.ru/).
49. Никитин Н. Н. Курс теоретической механики: Учеб. для машиностроит. и приборостроит. спец. вузов / Н.Н. Никитин. – М.: Высш. шк., 1990. – 607 с.
50. Нелюбов А. И. Планирование эксперимента при разработке оптимальных конструкций с/х техники / А. И. Нелюбов, Э. П. Флик // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1974. – № 11. – С. 19 – 21.
51. Останин Р.И. Параметры и режимы работы дисково-ленточного устройства для повышения эффективности сортирования картофеля на фракции: дис. ...канд. тех. наук. 05.20.01 / Рудольф Иванович Останин. – СПб – Пушкин., 1986. – 222 с.
52. 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.

53. Плахов С.А. Исследование технологического процесса виброротационной сортировки картофеля / С.А. Плахов, В.М. Алакин // Научные технологии в приборостроении и развитии 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.
54. Плахов С.А. Исследование процесса ориентирования клубней при вибрационном действии роторов / С.А. Плахов // Научные технологии в приборостроении и развитии 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.
55. Петров Г.Д. Картофелеуборочные машины / Г.Д. Петров. - М.: Машиностроение, 1972. – 395 с.
56. Петров Г.Д. Картофелеуборочные машины / Г.Д. Петров. – М.: Машиностроение, – 1984. – 320 с.
57. Плахов С.А. Обоснование формы пальцев ротора виброротационной сортировки / С.А. Плахов, В.М. Алакин, Г.С. Никитин // Научные технологии в приборостроении и развитии 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.
58. Писарев Б.А. Производство картофеля: возделывание, уборка, послеуборочная доработка, хранение. Справочник / Б.А.Писарев. – М.: Росагропромиздат, 1990. – 223 с.
59. Потураев В.Н. Резиновые детали машин / В.Н. Потураев, В.И. Дырда. – М.: Машиностроение. 1977. – 216 с.
60. Плахов С.А. Результаты разработки и внедрения виброротационной сортировки картофеля / С.А. Плахов – Калуга.: Издательство КЦДО, 2014. – 12 с.
61. Погуляев А.Д. Теоретическое и экспериментальное обоснование режимов и некоторых параметров ротационного сепаратора / А.Д. Погуляев // Труды ЧИМЭСХ. Выпуск 93. – Челябинск, 1974. – С. 91 – 98.

62. Пшеченков К.А. Технологии и средства механизации для уборки и послеуборочной доработки картофеля / К.А. Пшеченков, Н.Н. Колчин, С.В. Мальцев // Картофель и овощи. – 2012. – № 5 С. 8 - 10.
63. Прямов, С.Б. Эффективность уборки картофеля и овощей машинами разных типов / С.Б. Прямов, К.А. Пшеченков, С.В. Мальцев, Н.Н. Колчин // Картофель и овощи. - 2012. - № 4 - С. 5 – 7.
64. Перспективные технологии производства картофеля для Нечерноземной зоны Российской Федерации (Организационно-технологический проект). – М.: ЦНТИПР Минсельхозпрода России, 1995. – 96 с.
65. Приемный бункер Grimme: дополнительное оснащение серии RH / [Электронный ресурс] Сайт фирмы ««Гриме» завод сельскохозяйственных машин». – Электрон дан. – Режим доступа: [Web http://www.grimme.com/](http://www.grimme.com/).
66. Размыслович И.Р. К вопросу сепарации почвы пайлерными сепараторами / И.Р. Размыслович, Н.И. Чипурко // Труды ЧИМЭСХ. Выпуск 78. – Челябинск, 1974. – С. 45.
67. Рамазанов А.Г. Качество работы навесного вибрационного свеклокопателя / А.Г. Рамазанов // Техника и оборудование для села. – 2003. – № 10 – С. 22.
68. Рогов В. А. Методика и практика технических экспериментов / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 288 с.
69. Румишинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румишинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
70. Ротационный сепаратор для корнеклубнеплодов: пат. 2092012 Рос. Федерация: МПК6 А 01 D 33/08 / Мишин П.В.; заявитель и патентообладатель Чувашский сельскохозяйственный институт. – № 93033352/13; заявл. 28.06.1993; опубл. 10.10.1997.
71. Ротационный сепаратор: пат. 2328101 Рос. Федерация, МПК А 01 В 43/00, А 01 G 23/06 / Кондратьев А.В.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тверской государственный технический университет». – №2006140859/12; заявл. 20.11.2006; опубл. 10.07.2008.

72. Саврасова Н.Р. Анализ контактного динамического взаимодействия клубня картофеля с поверхностью / Н.Р. Саврасова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 12, № .1 (2), 2010. – С. 493 – 498.
73. Спиваковский А.О. Вибрационные контейнеры, питатели и вспомогательные устройства./ А.О. Спиваковский, И.Ф. Гончаревич. – М., «Машиностроение», 1972. – 328 с.
74. Сорокин А.А. Качение-скольжение клубней по рабочим органам картофелеуборочных машин / А.А. Сорокин // Тракторы и сельхозмашины. – 1975. – № 12. – С. 27 – 28.
75. Суханов В. А. Методы расчета экономической эффективности новой техники / В. А. Суханов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1974. – № 11. – С. 35 – 37.
76. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера / В.П. Сигорский. – Киев.: Техника, 1977. – 766 с.
77. Сафразбекян О.А. Обоснование необходимой длины рабочей поверхности сепараторов картофелеуборочных комбайнов / О.А. Сафразбекян // Труды ВИМ. Выпуск 93. – М., 1982. – С. 32 – 38.
78. Сероватов Д.С. Отделение камней от клубней картофеля по их упругости / Д.С. Сероватов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1989. – № 8 – С. 10 – 11.
79. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
80. Сорокин А.А. Расчет почвосепарирующей поверхности картофелеуборочного комбайна / А.А. Сорокин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1983. – № 1 – С. 17 – 18.
81. Степанов А.Н. Результаты исследования роликово-дисковой картофелесортировки / А.А. Степанов, Е.Е. Орешин, Г.А. Логинов // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования: Сборник научных трудов СПбГАУ. – СПб – Пушкин, 2009. – С. 297 – 301.

82. Сорокин А.А. Сепарация клубней картофеля от почвенных комков (камней) по массе и коэффициенту восстановления скорости / А.А. Сорокин // Тракторы и сельхозмашины. – 1978. – № 2. – С. 24 – 26.
83. Современные сельскохозяйственные машины и оборудование для растениеводства (конструкции и основные тенденции развития): По материалам Международного салона сельскохозяйственной техники SIMA-1997. – М.: ИНФРА – М, 1997. – 176 с.
84. Системы сортировки Miedema / [Электронный ресурс] Сайт фирмы «Miedema». – Электрон дан. – Режим доступа: [Web: http://www.miedema.com/](http://www.miedema.com/)
85. Сортировки картофеля и лука СИПМА РУ / [Электронный ресурс] Сайт ООО «СИПМА РУ». – Электрон. дан. – Режим доступа: [Web: http://www.sipma.ru/](http://www.sipma.ru/)
86. Табачук В.И. Исследование повреждаемости клубней картофеля при ударе / В.И. Табачук // Записки ЛСХИ. – Л.: 1953. – Выпуск 7. – С. 90 – 99.
87. Тульчеев В.В. Картофелепродуктовый подкомплекс России: проблемы и перспективы экономического развития / В.В Тульчеев. – М.: Агропрогресс, 2001. – 246 с.
88. Туболев С.С Машинные технологии и техника для производства картофеля / С.С. Туболев, С.И. Шеломенцев, К.А. Пшеченков, В.Н. Зейрук В.Н. – М.: Агро-роспас. – 2010. – 316 с.
89. Туболев С.С. Развитие отечественного сельскохозяйственного машиностроения на примере производства специальной техники для картофелеводства и овощеводства / С.С. Туболев, Н.Н. Колчин. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех». – 2011. – 68 с.
90. Технология и комплексы машин для возделывания важнейших сельскохозяйственных культур. Ч. 1. Картофель. – М.: ИНФРА-М. – 1997. – 104 с.
91. Устройство для транспортировки и очистки корнеплодов: пат. 22829682 Рос. Федерация, МПК А01D33/08 / Новиков М.А.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. – № 2005111519/12; заявл. 18.04.2005; опубл. 10.09.2006, Бюл. № 25.

92. Установка для послеуборочной обработки плодоовощной продукции(варианты): пат. 2489067 Рос. Федерация, МПК⁶ А23N15/00. / Алакин В.М.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Центр инноваций и молодежного предпринимательства «Калужский бауманец». – № 2011150170/13; заявл. 09.12.2011; опубл. 10.08.2013., Бюл. № 22.
93. Фомин И.М. Картофелеуборочный комбайн для переувлажненных каменных почв / И.М. Фомин, В.В. Пузанов, Д.Г. Петров // Техника в сельском хозяйстве. – 1989. – № 5. – С. 49 – 50.
94. Фурлетов В.М. Совершенствование рабочих органов для отделения корнеплодов от примесей / В.М. Фурлетов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1983. – № 11. – С. 32 – 34.
95. Хвостов В.А. Машины для уборки корнеплодов и лука / В.А. Хвостов, Э.С. Рейнгарт. – М.: А.О. «Полимат», 1995. – 391 с.
96. Шабельник Б.П. Геометрия кулачков транспортера – очистителя корнеуборочной машины./ Б.П. Шабельник // Тракторы и сельхозмашины. – 1975. – № 8. – С. 18 – 21.
97. Шабельник Б.П. Движение по активной поверхности очистителя системы компонентов вороха корнеплодов, взаимосвязанных эластичными элементами / Б.П. Шабельник // Механизация и электрификация сельскохозяйственных процессов в полеводстве. Сборник научных трудов. – зерноград: ВНИПТИМЭСХ, 1989. – С. 80 – 82.
98. Шабуров Н.В. Калибрование клубней картофеля / Н.В. Шабуров // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1987. – № 10. – С. 33 – 35.
99. Шабуров Н.В. Послеуборочная обработка картофеля и закладка на хранение / Н.В. Шабуров // Рекомендации по интенсификации отрасли картофелеводства в НЗ России. Сборник научных трудов. – СПб – Пушкин.: – 1990. – С. 67 – 86.
100. Шабуров Н.В. Результаты теоретических и экспериментальных исследований по созданию роторного сепаратора для обработки картофеля / Н.В. Шабуров, С.С. Остроумов. – СПб – Пушкин.: – 1991. – С. 4 – 29.

101. Шабуров Н.В. Результаты исследования ротационного сепаратора / Н.В. Шабуров, Л.Я. Лебедев // Уральские Нивы. – 1989. – № 12. С 17 – 18.
102. UK Patent Application GB 2313284 A, Agricultural separating device, David Booth Weston, Application Richard Pearson Limited
103. Norbert U. Haase Potato development in changing Europe / Norbert U. Haase, Anton J. Haverkort. // The Netherlands. Wageningen Academic Publishers – 2006. – 278 p.
104. A. J. Haverkort Potato in progress (science meet practice) / A. J. Haverkort, P. C. Struik. // The Netherlands. Wageningen Academic Publishers – 2005. – 366 p.
105. A. J. Haverkort Potato production and innovation technologies / A. J. Haverkort, B. V. Anisimov. // The Netherlands. Wageningen Academic Publishers – 2007. – 422 p.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Обработка результатов полнофакторного эксперимента
по определению точности сортирования

Матрица плана эксперимента с результатами измерения точности сортирования приведена в таблице 3.3.

Таблица 1 – Результирующая матрица проведенного эксперимента

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1^2 - 0,73$	$x_2^2 - 0,73$	$x_3^2 - 0,73$	Y
1	+	+	+	+	+	+	+	+0,27	+0,27	+0,27	62,2
2	+	-	+	+	-	-	+	+0,27	+0,27	+0,27	66,7
3	+	+	-	+	-	+	-	+0,27	+0,27	+0,27	64,5
4	+	-	-	+	+	-	-	+0,27	+0,27	+0,27	78,6
5	+	+	+	-	+	-	-	+0,27	+0,27	+0,27	68,2
6	+	-	+	-	-	+	-	+0,27	+0,27	+0,27	78,3
7	+	+	-	-	-	-	+	+0,27	+0,27	+0,27	66,4
8	+	-	-	-	+	+	+	+0,27	+0,27	+0,27	68,5
9	+	+1,215	0	0	0	0	0	+0,746	-0,73	-0,73	77,8
10	+	-1,215	0	0	0	0	0	+0,746	-0,73	-0,73	82,5
11	+	0	+1,215	0	0	0	0	-0,73	+0,746	-0,73	78,4
12	+	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	+0,746	-0,73	85,6
13	+	0	0	+1,215	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,746	83,5
14	+	0	0	-1,215	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,746	80,5
15	+	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	89,7

Благодаря ортогональности матрицы коэффициенты регрессии определены независимо друг от друга, с использованием соотношения

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2} :$$

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^{15} x_{0j} y_j}{\sum_{j=1}^{15} x_{0j}^2} = 75,4;$$

$$b_1 = \frac{\sum_{j=1}^{15} x_{1j} y_j}{\sum_{j=1}^{15} x_{1j}^2} = -3,3;$$

$$b_2 = \frac{\sum_{j=1}^{15} x_{2j} y_j}{\sum_{j=1}^{15} x_{2j}^2} = -1,04;$$

$$b_3 = \frac{\sum_{j=1}^{15} x_{3j} y_j}{\sum_{j=1}^{15} x_{3j}^2} = -0,51;$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{j=1}^{15} (x_1 x_2)_j y_j}{\sum_{j=1}^{15} (x_1 x_2)_j^2} = 0,2;$$

$$b_{13} = \frac{\sum_{j=1}^{15} (x_1 x_3)_j y_j}{\sum_{j=1}^{15} (x_1 x_3)_j^2} = -0,8;$$

$$b_{23} = \frac{\sum_{j=1}^{15} (x_2 x_3)_j y_j}{\sum_{j=1}^{15} (x_2 x_3)_j^2} = -3,2;$$

$$b_{11} = \frac{\sum_{j=1}^{15} x'_{1j} y_j}{\sum_{j=1}^{15} (x'_1)_j^2} = -8,2;$$

$$b_{22} = \frac{\sum_{j=1}^{15} x'_{2j} y_j}{\sum_{j=1}^{15} (x'_2)_j^2} = -6,9;$$

$$b_{33} = \frac{\sum_{j=1}^{15} x'_{3j} y_j}{\sum_{j=1}^{15} (x'_3)_j^2} = -6,9.$$

После подстановки значений коэффициентов в уравнение полинома

$$y = b'_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11}(x_1^2 - 0,73) + b_{12}(x_2^2 - 0,73) + b_{13}(x_3^2 - 0,73),$$

оно получило вид:

$$y = 75,4 - 3,3x_1 - 1,04x_2 - 0,51x_3 + 0,2x_1x_2 - 0,8x_1x_3 - 3,2x_2x_3 - 8,2(x_1^2 - 0,73) - 6,9(x_2^2 - 0,73) - 6,9(x_3^2 - 0,73).$$

Дисперсии коэффициентов регрессии вычисляются по формуле:

$$s^2\{b_i\} = \frac{s_y^2}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2},$$

где s_y^2 – дисперсия воспроизводимости эксперимента.

Для вычисления дисперсии воспроизводимости эксперимента выполнены несколько опытов в центре плана. По результатам опытов в центре плана вычислена дисперсия:

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2}{n_0 - 1},$$

где n_0 – число параллельных опытов в нулевой точке;

y_u – значение параметра оптимизации в u -м опыте;

$\bar{y}$ – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в n_0 параллельных опытах.

В соответствии с матрицей ортогонального планирования эксперимента для трех факторов (таблица 3) центром плана является опыт № 15. В связи с этим:

$$\bar{y} = y_{15}.$$

Расчет дисперсии воспроизводимости представлен в таблице 2.

Дисперсии коэффициентов имеют значения, представленные в таблице 3.

Доверительные интервалы для коэффициентов равны:

$$\Delta b_0 = \pm t_T s\{b_0\};$$

$$\Delta b_i = \pm t_T s\{b_i\};$$

$$\Delta b_{il} = \pm t_T s\{b_{il}\};$$

$$\Delta b_{ii} = \pm t_T s\{b_{ii}\},$$

где $t_T - t$ – критерий Стьюдента.

Величина данного критерия зависит от принятого доверительного уровня вероятности (уровня значимости) α и числа степеней свободы f , с которым определялась дисперсия s_y^2 :

$$f = n_0 - 1 = 3 - 1 = 2.$$

Таблица 2 – Расчет дисперсии воспроизводимости эксперимента

Номер опыта в центре плана	y_u	$\bar{y} = y_{15}$	$(y - \bar{y})^2$
1	77,8	77,5	0,09
2	80		6,25
3	74,7		7,84
$S_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2 = 14,18$		$s_y^2 = 7,09$	

Дисперсии коэффициентов, вычисленные по формуле (4.6). Они имеют значения, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Дисперсии коэффициентов уравнения регрессии

$s^2\{b_i\}$	$s^2\{b_1\}$	$s^2\{b_2\}$	$s^2\{b_3\}$	$s^2\{b_{12}\}$	$s^2\{b_{13}\}$	$s^2\{b_{23}\}$	$s^2\{b_{11}\}$	$s^2\{b_{22}\}$	$s^2\{b_{33}\}$
0,473	0,637	0,637	0,637	0,443	0,443	0,443	0,945	0,945	0,945

При доверительном уровне вероятности, принятом равным $\alpha=5\%$ и числе степеней свободы $f=2$, t – критерий Стьюдента равен $t_T=4,3$.

Значения коэффициентов уравнения регрессии и их доверительных интервалов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения коэффициентов уравнения регрессии и их доверительных интервалов

B_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Δb_0	Δb_1	Δb_2	Δb_3	Δb_{12}	Δb_{13}	Δb_{23}	Δb_{11}	Δb_{22}	Δb_{33}
75,4	-3,3	-1,04	-0,51	0,2	-0,8	-3,2	-8,2	-6,9	-6,9
/2,95	/3,43	/3,43	/3,43	/2,86	/2,86	/2,86	/4,18	/4,18	/4,18

Поскольку $|\Delta b_2| > |b_2|$, $|\Delta b_3| > |b_3|$, $|\Delta b_{12}| > |b_{12}|$, $|\Delta b_{13}| > |b_{13}|$, то эти коэффициенты являются незначимыми при 5 % – ом уровне значимости.

Тогда математическая модель зависимости точности сортирования клубней от подачи картофеля, частоты вибрации и угловой скорости вращения роторов примет вид:

$y = 91,46 - 3,3x_1 - 1,04x_2 - 0,51x_3 + 0,2x_1x_2 - 0,8x_1x_3 - 3,2x_2x_3 - 8,2x_1^2 - 6,9x_2^2 - 6,9x_3^2$
Уравнение составлено в кодированной форме, и его необходимо перевести к натуральному виду. Для этого подставим в уравнение вместо переменных x_1 , x_2 , x_3 выражения:

$$x_1 = \frac{q - x_0}{\Delta x} = \frac{q - 4}{1};$$

$$x_2 = \frac{\omega_p - x_0}{\Delta x} = \frac{\omega_p - 5}{1};$$

$$x_3 = \frac{\nu - x_0}{\Delta x} = \frac{\nu - 10}{5}.$$

Окончательное уравнение в натуральной форме:

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

Данное уравнение описывает зависимость точности сортирования клубней от управляемых факторов: x_1 – подачи картофеля, x_2 – угловой скорости вращения роторов, x_3 – частоты вибрации.

Приложение Б

Исходные данные для расчета экономической эффективности
использования экспериментального образца виброротационной сортировки
в составе технологической линии

№ п/п	Показатель	Единица измерения	Обо- значе- ние	Числовое значение по- казателей устройства	
				С6РК15	Экспери- ментальная сортировка
1	Масса устройства	кг	M	1450	780
2	Цена устройства	тыс. руб	C	579,427	359
3	Производительность за час времени: основного сменного	т/ч	$W_{осн}$ $W_{см}$	20 18	18 16
4	Количество обслу- живающего персо- нала	человек	-	1	1
5	Часовая тарифная ставка механика	руб	-	140	140
6	Цена на электро- энергию	Руб/кВт*ч	-	6,58	6,58
7	Коэффициент эф- фективности капи- тальных вложений	%	E	0,15	0,15
8	Норма отчислений на ремонт и ТО	%	R	9	9
9	Норма амортизаци- онных отчислений	%	A	14,2	14,2