

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

На правах рукописи



НИКИТИН ГЕННАДИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
КАРТОФЕЛЕКОПАТЕЛЯ ПУТЕМ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ И
РЕЖИМОВ РОТАЦИОННОГО СЕПАРАТОРА**

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 - 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Анализ технологий и средств уборки картофеля	10
1.1 Технологии и способы уборки картофеля	10
1.2 Анализ конструкций и режимов работы сепарирующих устройств картофелеуборочных машин	20
1.3 Обзор конструкций интенсификаторов сепарации	40
1.4 Выводы	48
2. Теоретические исследования по обоснованию технологической схемы и параметров основных рабочих органов ротационного картофелекопателя	50
2.1 Обоснование технологической схемы картофелекопателя и основных параметров приемно-подающего битера и роторов сепаратора	50
2.2 Обоснование основных конструктивных параметров ротационного рабочего органа	59
2.3 Определение деформаций выступов роторов, возникающих под действием рабочих нагрузок	66
2.4 Определение режимов работы четырех лопастного битера	69
2.5 Обоснование рациональных кинематических режимов ротационных рабочих органов в зоне интенсивной сепарации	80
2.6 Исследование процесса перемещения компонентов картофельного вороха в зоне окончательной очистки	86
2.7 Выводы	94
3. Программа и методика экспериментальных исследований	96
3.1 Программа экспериментальных исследований	96
3.2 Методика исследования устойчивости перемещения картофельного пласта и сепарирующей способности лопастного битера и ротационного сепаратора	96
3.3 Методика экспериментальных исследований по определению режимов работы ротационного картофелекопателя	99

3.4 Методика исследований по определению основных эксплуатационных характеристик ротационного картофелекопателя в полевых условиях	101
3.5 Планирование многофакторного эксперимента по определению режимов работы ротационного картофелекопателя	103
3.6 Объект исследований, измерительные приборы и аппаратура	108
4. Результаты экспериментальных исследований в производственно-полевых условиях	113
4.1 Результаты исследований устойчивости перемещения картофельного пласта и сепарирующей способности лопастного бitera и ротационного сепаратора	113
4.2 Анализ результатов экспериментальных исследований по определению режимов работы ротационного картофелекопателя	117
4.3 Анализ результатов опытов по определению основных эксплуатационных характеристик ротационного картофелекопателя	127
4.4 Выводы	130
5. Техничко-экономическая оценка применения картофелекопателя ротационного типа	132
5.1 Расчет экономической эффективности предложенного технического решения	132
5.2 Выводы	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	141
ПРИЛОЖЕНИЕ А	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	157
ПРИЛОЖЕНИЕ В	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	162
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	163

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Картофель является одной из самых востребованных сельскохозяйственных культур массово возделываемой как в России, так и во всём мире. В нашей стране под его посадками занято 1325 тыс. га, а общий объем производства составляет в среднем более 31,1 млн. тонн. Более 80% урожая картофеля убирается механизированным способом в сложных почвенно-климатических условиях Российской Федерации, что приводит к снижению эффективности работы применяемых картофелеуборочных машин, повышению повреждаемости клубней и себестоимости картофеля. Опыт эксплуатации картофелеуборочных машин в различных регионах указывает на недостаточную эффективность сепарации суглинистых и серых лесных почв, а также на отсутствие возможности регулирования рабочих параметров сепараторов под конкретные условия уборки. В большинстве картофелеуборочных машин в качестве сепарирующего устройства используются прутковый элеватор или качающийся грохот. При работе на суглинистых и серых лесных почвах наблюдается значительное залипание почвой и забивание растительными остатками их рабочих органов, из-за чего снижается сепарирующая способность и производительность картофелеуборочных машин, а также увеличивается повреждаемость клубней.

На основании изложенного, разработка перспективных сепараторов ротационного типа комбинированной конструкции с регулируемыми технологическими параметрами является актуальной задачей.

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ кафедры «Колесные машины и прикладная механика» Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Степень разработанности темы. Аналитический обзор материалов по исследуемой тематике произведен на основе работ известных ученых: В.М. Алакина, В.М. Алесенко, С.Н. Борычева, Н.В. Бышова, Я.И. Верменко, Н.И.

Верещагина, В.В. Воронкова, С.В. Герасимова, А.А. Голикова, В.П. Горячкина, И.П. Гудзенко, Н.Н. Колчина, Н.Ф. Диденко, С.Н. Крашенникова, Н.И. Кривонова, А.В. Кузьмина, Н.П. Ларюшина, А.Г. Максимова, И.Н. Масленкова, М.Г. Мацепуро, В.П. Медведева, С.С. Остроумова, Г.Д. Петрова, И.И. Попова, И.Р. Размысловича, Г.К. Рембаловича, Г.П. Солодухина, А.А. Сорокина, М.Б. Угланова и многих других.

Проведенные исследования, а также результаты технологических и конструктивных решений, направленных на повышение эффективности процесса уборки картофеля, указывают на необходимость и возможность дальнейшего совершенствования технических средств и процессов уборки картофеля, в том числе в направлении разработки новых сепарирующих устройств ротационного типа.

Цель исследований: повысить сепарирующую эффективность картофелекопателей путем обоснования рациональных параметров и режимов работы ротационного сепаратора почвы.

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

- выявить пути повышения сепарирующей эффективности сепараторов картофелекопателей;
- разработать ротационное сепарирующее устройство и приемно-подающий бита, обеспечивающие высокую эффективность сепарации почвенных примесей;
- теоретически определить основные конструктивные параметры и рабочие режимы вращения лопастного бита и роторов сепаратора;
- исследовать влияние разработанного ротационного сепаратора на качественные показатели работы картофелекопателя и определить экономический эффект от внедрения устройства.

Научная новизна:

- схема копателя, отличающаяся совмещением рабочих процессов приемного бита и ротационного сепаратора, обеспечивающих прием, интенсивное разрушение, устойчивую подачу картофельного пласта и высокоэффективную сепарацию почвы;

- аналитическая зависимость устойчивого перемещения части картофельного пласта выступами ротора от характеристик почвы и минимального угла захвата части картофельного пласта рабочей секцией сепаратора, отличающаяся возможностью определения угла наклона выступов ротора;

- аналитические зависимости, описывающие перемещение компонентов картофельного пласта по ротационному сепаратору единым слоем и по отдельности, отличающиеся возможностью определения режимов вращения рабочих секций с учетом места их расположения на сепарирующей поверхности, частоты вращения четырех лопастного битера и скорости работы картофелекопателя;

- закономерность изменения полноты сепарации почвы в зависимости от рабочей скорости картофелекопателя, режимов вращения битера и роторов, отличающаяся учетом использования предлагаемого технического решения в полевых условиях Нечерноземной зоны РФ.

Теоретическую значимость имеют:

- аналитическая зависимость угла наклона выступов ротационного рабочего органа от характеристик почвы и минимального угла захвата части картофельного пласта рабочей секцией сепаратора;

- аналитические зависимости в виде уравнений динамики, позволяющие описать процесс безотрывного перемещения компонентов картофельного вороха и щадящего действия на них выступов роторов в зависимости от режима вращения рабочих секций сепаратора и характеристик компонентов вороха;

- устройство, совмещающее приемный битер и ротационный сепаратор и отличающееся усовершенствованной формой рабочих органов, обеспечивающих высокую эффективность разрушения и сепарации суглинистой почвы при снижении энергоемкости картофелекопателя и повреждаемости клубней;

- экспериментально доказанные положения о возможности использования результатов моделирования рабочих процессов ротационного устройства для оценки полноты сепарации почвы при изменении режимов работы битера, роторов сепаратора и их конструкции.

Практическую значимость составляют:

- принцип совмещения в конструкции картофелекопателя усовершенствованного приемного битера и ротационного сепаратора, обеспечивающих высокоэффективное выделение суглинистой почвы при безотрывном перемещении компонентов картофельного пласта связанным слоем и по отдельности;
- лопастное, комбинированное устройство битера с регулируемыми отражающими щитками и обрезиненными регулируемыми лопастями, позволяющее повысить интенсивность приема и разрушения суглинистого пласта, а также обеспечивающее устойчивость и управление подачей пласта на первую секцию сепаратора без повреждения клубней;
- устройство и параметры нового ротационного сепаратора, обеспечивающие повышение полноты сепарации суглинистой почвы при снижении его энергоемкости, залипания роторов и повреждаемости клубней;
- практические рекомендации по определению рациональных режимов вращения приемного битера и ротационного сепаратора в зависимости от рабочей скорости картофелекопателя, в том числе в полевых условиях с суглинистой почвой.

Объекты исследования: процессы перемещения и сепарации картофельного пласта лопастным битером и ротационным сепаратором картофелекопателя.

Предмет исследования: закономерности работы картофелекопателя при использовании в его конструкции лопастного битера и сепарирующего устройства ротационного типа.

Методология и методы исследования. Теоретическая часть исследований выполнена с использованием основных положений теоретической механики и методик анализа сложных, нагруженных механических систем, закономерностей начертательной геометрии, сопротивления материалов и положений математического анализа. Обоснование конструктивных и кинематических параметров основных рабочих органов ротационного типа

произведено с использованием результатов исследований в этой области и принятых методик в области разработки сельскохозяйственных машин. Экспериментальные исследования выполнены на основе стандартных отраслевых методик агротехнической оценки уборочных машин и проведения экспериментов с применением математического планирования, с учетом общепринятых правил подготовки экспериментального образца к опытам и обработки результатов исследований.

Положения, выносимые на защиту:

- аналитическая зависимость устойчивого перемещения части картофельного пласта выступами ротора от характеристик почвы и минимального угла захвата части картофельного пласта рабочей секцией сепаратора, отличающаяся возможностью определения угла наклона выступов ротора;
- аналитические зависимости, описывающие перемещение компонентов картофельного пласта по ротационному сепаратору единым слоем и по отдельности, отличающиеся возможностью определения режимов вращения его рабочих секций с учетом места их расположения в сепарирующей поверхности, частоты вращения четырех лопастного битера и скорости работы картофелекопателя;
- экспериментальный образец нового ротационного картофелекопателя, рациональные параметры и режимы работы предлагаемых в устройстве - приемного битера и ротационного сепаратора;
- качественные показатели работы ротационного картофелекопателя в почвенно-климатических условиях Калужской области, с учетом технологического совмещения усовершенствованной конструкции битера и ротационного сепаратора.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность основных положений работы подтверждена объективностью и сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований (расхождение не превышает 5%).

Основные положения диссертационной работы были изложены на Всероссийских и региональных научных конференциях Калужского филиала МГТУ имени Н. Э. Баумана «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» от 10–12 декабря 2013 г., 22–25 апреля 2014 г., 25–27 ноября 2014 г., 24–26 ноября 2015 г., 19–21 апреля 2016 г., 15–17 ноября 2016 г., 13–15 ноября 2018 г., а также на студенческой конференции «Молодежные инновации – Калужской области» 10 апреля 2013 г. и на научно-практической конференции с международным участием ФГБНУ «Калужский НИИСХ» «Инновационные разработки для развития отраслей сельского хозяйства региона» 19 апреля 2019 г.

Результаты исследований приняты к внедрению в учебный процесс Российского государственного аграрного университета - МСХА имени К.А. Тимирязева. Переданные материалы исследований включены в лекционный курс и лабораторные работы по дисциплине «Сельскохозяйственные машины» для бакалавров по направлению 35.03.06 – Агроинженерия. Результаты исследований приняты к внедрению в производство ФГБНУ «Калужский Научно-исследовательский институт сельского хозяйства». Переданные материалы исследований используются при опытной эксплуатации ротационного картофелекопателя.

Публикации: по материалам диссертации опубликованы 11 научных статей, из которых три – в рецензируемых научных изданиях, получено положительное решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2018126239/10(041621) «Картофелекопатель ротационный (варианты)».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, включающего 120 наименований, пяти приложений. Объем диссертации составляет 165 страниц машинописного текста, включая 56 рисунков и 10 таблиц.

1. Анализ технологий и средств уборки картофеля

1.1 Технологии и способы уборки картофеля

Уборка является самым трудоемким и энергоемким этапом производства картофеля. По данным ВНИИКХ на ее долю приходится от 31 % до 35 % всех трудозатрат [44,59,81,106]. Это связано с тем, что почва занимает большую часть картофельной грядки. Следовательно, для получения чистых клубней необходимо разрушить и просеять большое количество почвенных примесей.

Время начала и продолжительность уборки зависят от сорта выращиваемого картофеля, почвенно-климатических, экономических и др. условий. В центрально-нечерноземной зоне среднеспелые сорта начинают убирать в конце августа - в начале сентября, а ранние и поздние сорта соответственно на десять дней раньше или позже. К этому периоду ботва частично или практически полностью отмирает, а температура воздуха опускается в среднем до $+5...+10^{\circ}\text{C}$. В данных условиях ускоряется дозревание и снижается травмирование клубней рабочими органами картофелеуборочных машин [44,59,70]. Влажность почв также оказывает существенное влияние на процесс уборки картофеля. Для супесчаных почв ее оптимальное значение составляет 10...15%, а для суглинистых 16...22%. Увеличение содержания влаги в подкапываемом слое сопровождается ростом тягового сопротивления картофелеуборочной машины. Также повышаются нагрузка и износ сепарирующего устройства, возрастает вероятность залипания подкапывающих и сепарирующих рабочих органов [92]. Как показывает практика, во многих случаях влажность почвы играет решающую роль при выполнении уборки и выборе типа картофелеуборочной техники.

Согласно [44,59] общая технологическая схема уборки картофеля состоит из следующих операций:

- 1) Удаление ботвы.
- 2) Подготовка поля.

3) Уборка.

4) Транспортирование клубней к месту обработки и хранения.

Предуборочное удаление ботвы позволяет снизить время созревания, вероятность заражения фитофторой и механические повреждения клубней. При машинной уборке картофеля за счёт этого уменьшается количество растительных остатков, наматывающихся на основные рабочие органы сепараторов. Удаление ботвы приводит к снижению износа и затрат энергии на привод картофелеуборочной техники, а также повышает сохранность самих клубней.

Предуборочное удаление ботвы подразделяется на два технологических этапа. На первом с помощью химических препаратов уничтожаются все растения на убираемом участке (десикация). Его проводят за 12...14 дней до уборки семенного картофеля и за 5...7 дней до сбора продовольственного [59]. Второй этап подразумевает скашивание и дробление обработанных химическими препаратами растений. В большинстве случаев для этого применяют устройства ротационного типа, такие как ботвоудаляющие машины КИР-1,5Б или ботводробители RSK 2000, БД-1, БД-2, ..., БД-6.

Однако, как показывает практика, на убираемых участках всегда остаётся от 30% до 35% растительных остатков [44]. Поэтому в картофелеуборочных машинах, наряду с ботвоудаляющими устройствами, должны быть предусмотрены конструктивные параметры и режимы работы сепараторов, обеспечивающие их самоочистку от растительных остатков.

При подготовке поля к уборке его сначала разбивают на отдельные участки и загонки. Для двухрядных картофелеуборочных машин загонку делают равной 12...16 рядкам, а для четырехрядных 52...60 рядкам. Затем с полей убирают крупные камни и посторонние предметы, а наиболее глубокие ямы и промоины от ливней выравнивают. Проходы уборочных машин ориентируют относительно стыковых междурядий. В случае необходимости может также проводиться предварительная уборка картофеля с поворотных полос [106].

Процесс уборки картофеля является наиболее сложной операцией. Она выполняется с помощью картофелеуборочных машин трех типов:

картофелекопателей, картофелекопателей-погрузчиков и картофелеуборочных комбайнов. Выбор способа уборки зависит от конфигурации и размеров полей, экономической целесообразности, физико-механических свойств почвы, урожайности, погодных условий и т.д. Непосредственно процесс уборки картофеля в значительной степени определяется физико-механическими свойствами почвы, степенью зрелости, расположением в гряде, размерами и формой клубней [92].

Характер расположения клубней в почве зависит от глубины их залегания, высоты гряд, ширины междурядий и расстояния между соседними гнездами. Данные параметры определяются применяемой технологией возделывания картофеля. К наиболее распространенным технологиям относятся [30,59,112]:

- заворовская (с междурядьем 70 см или 90 см);
- грядовая (с междурядьем 140 см или 110+30 см);
- голландская (с междурядьем 75 см);
- гриммовская.

В Нечерноземной зоне Российской Федерации и в Калужской области в частности картофель возделывается в основном по заворовской и голландской технологиям. Первую (с междурядьем 70 см) применяют при возделывании картофеля на легких и средних суглинистых почвах, которые преобладают в Жиздринском и Хвостовичском районах. В районах с тяжелыми глинистыми, а также со средними суглинистыми почвами (с повышенной влажностью) используют голландскую технологию с шириной междурядий 75 см и 90 см. Это позволяет увеличить объем формируемых гребней, за счет чего улучшается рост и развитие растений. К тому же данная технология больше подходит для энергонасыщенных тракторов. Максимальная высота гребней, в зависимости от типа посадки, может достигать 18...22 см, а глубина залегания нижнего клубня 20 см. Согласно [59] наиболее перспективными для НЗ РФ и других регионов являются междурядья 90 см.

Форма, размер и масса картофеля, прежде всего, определяются его сортом. Например, у клубней сорта «Ранняя роза» продолговатая форма, у сортов

«Эпрон» и «Лорх» округлая, а у сорта «Эпикур» бочковидная. Средний коэффициент формы для данных сортов составляет от 1,15 до 1,3. В тоже время размеры и форма картофеля сильно зависят от урожая, типа почвы, температурного и водного режимов и т.д. Как показали исследования, чем выше урожай, тем крупнее клубни, а при резких изменениях температуры их форма получается несимметричной [92]. Выявлено, что сепарирующие устройства картофелеуборочных машин эффективнее взаимодействуют и лучше очищают крупные клубни округлой формы [70].

Механический состав суглинистых и серых лесных почв в главной степени определяется размерами частиц, которые их образуют [33,55]. Так, по ГОСТ 25100-2011 принята следующая классификация твердых частиц почвы по размерам (таблица 1).

Таблица 1 – Основные гранулометрические фракции твердых частиц почвы

Название фракций размерами, мм			
Крупнообломочная	Песчаная	Пылеватая	Глинистая
более 2	2...0,05	0,05...0,005	менее 0,005

По данным [55,81,92] чем выше содержание влаги и частиц глины в почве, тем больше комков будет присутствовать в картофельном ворохе. К тому же значительно увеличатся связанность, липкость и удельная плотность подкапываемой гряды, что приведёт к росту скорости износа основных рабочих органов, тягового сопротивления и энергоёмкости картофелеуборочной машины. Поэтому для возделывания картофеля предпочтительнее использовать супесчаные и суглинистые почвы с содержанием влаги и частиц глины не более 20% и 10% соответственно. Классификация почв в зависимости от типа и процентного содержания глиняных частиц представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Классификация почв по процентному содержанию частиц глины

Наименование	Содержание глинистых частиц по массе, %
Глинистые почвы	более 30%
Суглинистые почвы	30...10%
Песчаные почвы	менее 3%
Супесчаные почвы	10...3%
Известняковые почвы	менее 3%
Торфяные почвы	

По данным [44,59,81,112] наибольшее применение в России и в мире нашли три способа уборки:

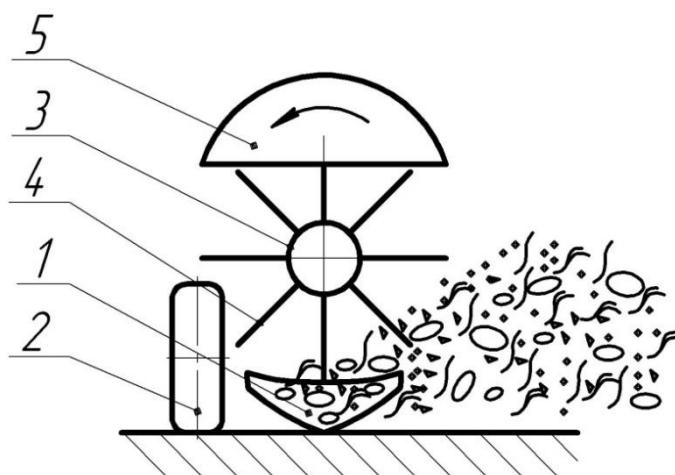
- 1) Выкапывание клубней картофелекопателями (с последующим ручным подбором).
- 2) Уборка картофелекопателями-погрузчиками.
- 3) Уборка комбайнами.

Первый способ применяется в условиях, когда невозможна уборка с помощью комбайнов или картофелекопателей-погрузчиков. В основном это поля со средними суглинистыми и тяжелыми глинистыми почвами, с повышенной влажностью, с уклоном более 3%, а также небольшие фермерские и семенные участки. Картофелекопатели обеспечивают лишь выкапывание и частичную сепарацию клубней, которые затем укладываются в рядок. Подбор картофеля осуществляется вручную бригадой 25...40 человек на один гектар. Их размещают так, чтобы каждый подборщик имел участок длиной не менее 15...25 м. Данный способ уборки характеризуется высокими затратами времени на погрузку и выгрузку урожая, что увеличивает и так высокую трудоемкость.

Рассмотрим основные варианты конструкций картофелекопателей. Картофелекопатель швырального типа КТН-1А является наиболее простой и

дешевой машиной, выпускаемой сегодня промышленностью. Он состоит из лемеха 1, опорного 2 и роторного 3 колес, а также гребенок 4 (рисунок 1). Защитный кожух 5 позволяет существенно снизить зону разброса клубней [30,44,81,112].

В процессе работы КТН-1А с помощью лемеха 1 подкапывает картофельную грядку и направляет ее к роторному колесу 3. Последнее с помощью гребенок 4 разрушает подкопанный пласт, а затем разбрасывает его рядом с подкопываемым рядком. Клубни и твердые почвенные комки располагаются вдоль движения картофелекопателя на расстоянии 1,5...3 м от края убираемой гряды.



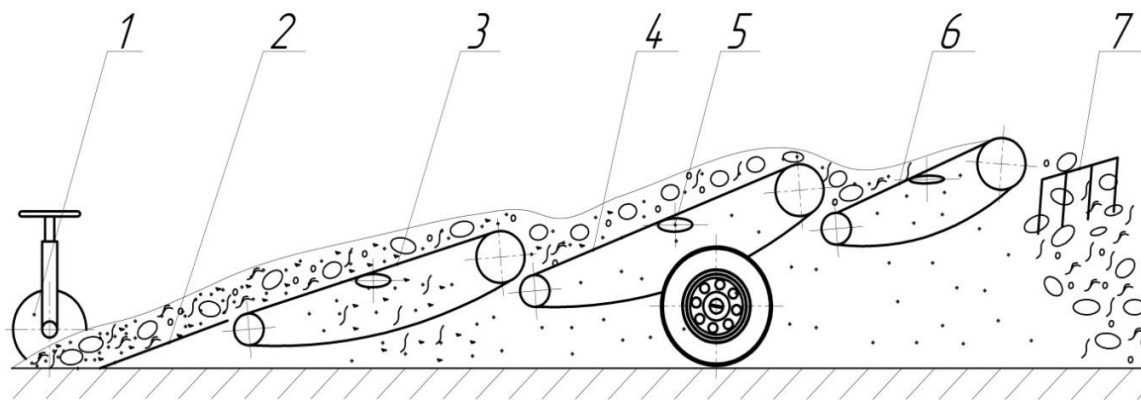
1- лемех; 2 – опорное колесо; 3 – роторное колесо;
4 – гребенка; 5 – защитный кожух

Рисунок 1 - Технологическая схема картофелекопателя КТН-1А

К основным недостаткам картофелекопателей швыряльного типа относятся: большие потери урожая (до 40% от общего объёма), высокая травмируемость клубней, а также значительные трудозатраты на подбор, которые на 20...25% выше, чем у картофелекопателей просеивающего типа.

Картофелекопатели просеивающего типа являются наиболее распространенным классом картофелеуборочных машин. Они бывают трех типов: элеваторные, грохотные и комбинированные.

Основу конструкций элеваторных картофелекопателей ККЭ-2; ККЭ-2М; КСТ-1,4; КСТ-1,4А; КТН-2В и др. составляют: подкапывающие рабочие органы (лемехи или ножи) 2, прутковые элеваторы 3 и 4, а также встряхивающие устройства 5 (рисунок 2) [37,38,47,66].



1- копирующий каток; 2 – лемех; 3 – первый прутковый элеватор;

4 – второй прутковый элеватор; 5 – встряхивающая звездочка;

6 - каскадный элеватор; 7 - сужающая гребенка

Рисунок 2 - Технологическая схема картофелекопателя КСТ-1,4А

Двигаясь по полю, элеваторные картофелекопатели с помощью лемехов 2 подкапывают две смежные грядки (рисунок 2). Для облегчения рабочего процесса, а также для уменьшения подачи растительных остатков на некоторых моделях дополнительно применяют вертикальные ножи или диски [81,106,112]. Глубина заглубления картофелекопателей просеивающего типа регулируется навеской трактора или с помощью копирующего катка 1. Далее картофельный пласт подается на первый прутковый элеватор 3, скорость которого выше скорости движения агрегата. За счет этого происходит интенсивное разрушение и разделение структуры пласта, а также исключается вероятность его сгуживания перед сепаратором. Для улучшения отделения примесей рабочие ветви прутковых элеваторов встряхиваются с помощью специальных звездочек 5. Как показали исследования [52,87,89] именно на первом элеваторе просеивается наибольшее количество примесей. Окончательное разрушение и удаление

почвенных комков происходит на втором элеваторе 4, после чего клубни сбрасываются позади машины.

Некоторые модели прицепных картофелекопателей оборудуются каскадными элеваторами 6, позволяющими существенно улучшить сепарацию примесей при работе на тяжёлых почвах с повышенной влажностью. Применение сужающих гребенок 7 позволяет укладывать убранный картофель в более плотный рядок, что снижает время на его подбор (рисунок 2).

Грохотные картофелекопатели вместо прутковых элеваторов используют один или два качающихся решета (грохота). В данных конструкциях лемех закрепляется на передней кромке грохота и вместе с ним совершает колебания. Для уравнивания возникающих инерционных сил используют спаренные грохоты с последовательным расположением решет. Они имеют положительный угол наклона, вследствие чего транспортирование картофельного вороха происходит с отрывом (скачками) [37,38]. В остальном процесс уборки картофеля аналогичен картофелекопателям элеваторного типа.

Основными недостатками грохотных картофелекопателей являются высокие знакопеременные нагрузки на рабочие узлы, невысокая сепарирующая способность и значительная повреждаемость клубней (до 20% по массе), особенно при работе на суглинистых почвах с повышенной влажностью [30,37].

Картофелекопатели-валкоукладчики выпускаются на базе картофелекопателей просеивающего типа. Для этого в их конструкцию добавляют поперечные транспортеры, а также дополнительные устройства для удаления ботвы. Это позволяет картофелекопателям-валкоукладчикам собирать клубни в один валок с 2-х, 4-х или 6-ти рядков, что значительно снижает время при ручном подборе (- 30...- 50%) и даёт возможность производить двухфазную комбайновую уборку [59,66].

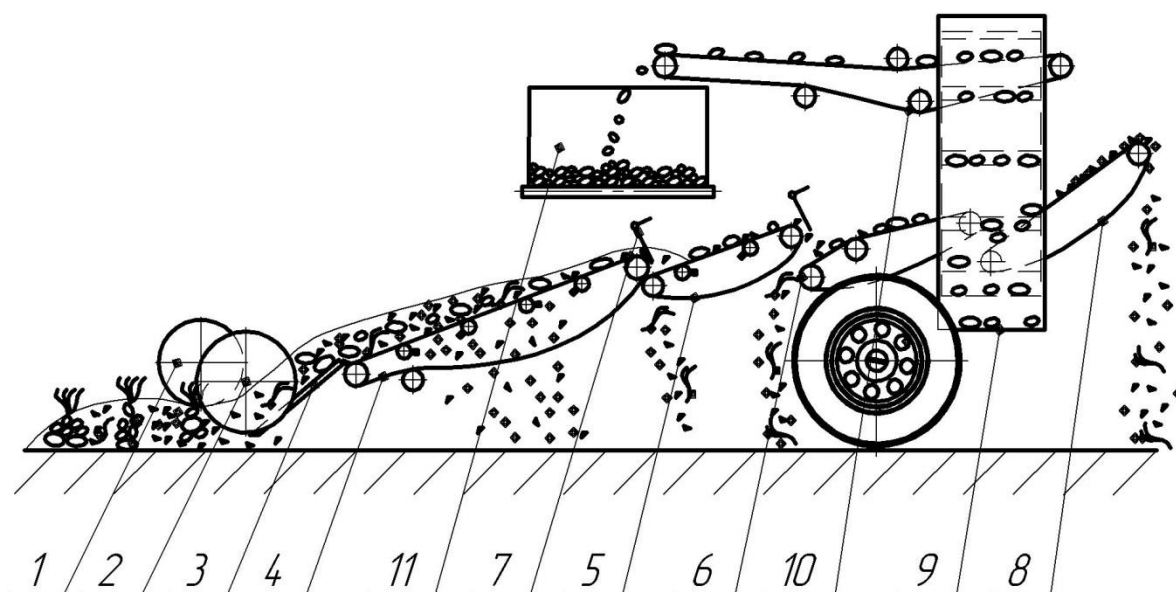
Картофелекопатели-погрузчики лучше всего подходят для уборки картофеля по прямоточной технологии. Данный способ характеризуется низким уровнем повреждения урожая, что обеспечивает максимальный срок его хранения [30,44,59,112]. Основное конструктивное отличие картофелекопателей-

погрузчиков от обычных картофелекопателей заключается в выгрузном транспортере, позволяющем перемещать убранный картофель непосредственно в прицеп или кузов рядом идущего транспортного средства [44,59,78]. Поэтому, чтобы обеспечить бесперебойную уборку урожая данным способом необходимо задействовать больше транспортных средств, чем при использовании обычных картофелекопателей [30,63].

Картофелеуборочные комбайны являются наиболее эффективными машинами для уборки картофеля. Их применяют в основном при промышленных объемах производства, на полях с урожайностью не менее 10 т/га и длиной гона не менее 300 м . Лучше всего для комбайновой уборки подходят легкие супесчаные и средние суглинистые почвы с твердостью не более $1,4 \text{ МПа}$, влажностью $18\ldots 22\%$, при максимальной глубине залегания нижних клубней $18\ldots 20 \text{ см}$ и ширине их гнезд до 40 см [44,76,77,81].

Подкапывающее устройство картофелеуборочного комбайна (рисунок 3) включает в себя катки 1, вертикальные диски 2 и лемеха 3. Далее располагаются основной 4, каскадный 5 и дополнительный 6 элеваторы, над которыми устанавливаются ботвоудаляющие устройства различной конструкции 7. В конце технологической схемы находятся сепарирующая горка 8, подъемный транспортер 9, переборочный стол 10 и бункер 11 [30,77].

В процессе работы картофелеуборочного комбайна лемеха 3 подкапывают две соседние грядки, которые предварительно уплотняются катками 1 и подрезаются вертикальными дисками 2 (рисунок 3). Затем картофельный пласт поступает на основной элеватор 4, где просеивается основное количество почвенных примесей. Оставшийся ворох доочищается на каскадном 5 и дополнительном 6 элеваторах. Растительные остатки удаляются ботвоудаляющими устройствами 7.



- 1 - каток; 2 – вертикальный диск; 3 – лемех; 4 – основной элеватор;
 5 – каскадный элеватор; 6 -дополнительный элеватор;
 7 - ботвоудаляющее устройство; 8 - сепарирующая горка;
 9 - подъемный транспортер; 10 - переборочный стол; 11 - бункер

Рисунок 3 - Технологическая схема картофелеуборочного
комбайна Grimme DR–1500

Окончательный этап механического разделения почвенных примесей и клубней происходит на сепарирующей горке 8. С нее оставшиеся компоненты картофельного вороха попадают на подъемный транспортер 9, который поднимает транспортируемый материал на переборочный стол 10. На нем компоненты вороха вручную перебирают, удаляя не отсепарированные почвенные комки и поврежденные клубни. После чего товарный картофель попадает в бункер 11. Согласно [44] его чистота должна быть не менее 80% при максимальной степени травмирования 10%. Общие потери урожая допускаются не более 3%, но не более 0,6 тонн с гектара.

Помимо прямого комбайнирования применяют также: раздельную (двухфазную) или комбинированную уборку.

Раздельный (двухфазный) способ предназначается для уборки картофеля в неблагоприятных условиях, т.е. на тяжелых почвах или при повышенной

влажности [44,59,81]. При нём картофелекопатель-валкоукладчик собирает клубни с 2-х, 4-х или 6-ти рядков в один валок для просушивания. После этого сухой картофель убирают картофелеуборочным комбайном.

Комбинированный способ уборки применяют для достижения максимальной производительности картофелеуборочного комбайна. С помощью картофелекопателя-валкоукладчика выкапывают клубни из двух (схема 2 + 2) или четырех (схема 2 + 4) смежных рядков и укладывают их в междурядья двух соседних или средних рядков. Затем клубни подбирают картофелеуборочным комбайном.

Проведенный анализ конструктивных особенностей картофелекопателей, картофелекопателей-погрузчиков и картофелеуборочных комбайнов показал, что каждый из способов уборки обладает своими преимуществами и недостатками. Поэтому наиболее перспективный вариант для условий НЗ РФ необходимо определять на основании эффективности конструкции картофелеуборочной машины в конкретных хозяйственных и почвенно-климатических условиях, учитывая сроки уборки и реализации продукции, а также объемы производства и экономическую целесообразность.

1.2 Анализ конструкций и режимов работы сепарирующих устройств картофелеуборочных машин

Изучением процесса сепарации картофельного вороха в разное время занимались, а также продолжают заниматься: В.М. Алакин, В.М. Алесенко, С.Н. Борычев, Н.В. Бышов, Я.И. Верменко, Н.И. Верещагин, В.В. Воронков, С.В. Герасимов, А.А. Голиков, В.П. Горячкин, И.П. Гудзенко, Н.Н. Колчин, Н.Ф. Диденко, Н.И. Кривоногов, А.В. Кузьмин, Н.П. Ларюшин, А.Г. Максимов, И.Н. Масленков, М.Г. Мацепуро, В.П. Медведев, С.С. Остроумов, Г.Д. Петров, И.И. Попов, И.Р. Размыслович, Г.К. Рембалович, Г.П. Солодухин, А.А. Сорокин, М.Б. Угланов, И.А. Успенский, Д.А. Федоров, В.А. Хвостов, Н.Н. Якутин, Allan L Jensen, Claus G Sorensen, Dionysis Bochtis, Zhou Kun, Sharma A.P. и другие.

В результате проведенных исследований было создано большое количество новых конструкций, а также модификаций уже существующих сепараторов. Вследствие этого возникла необходимость доработки общепринятых классификаций этих устройств. Поэтому в данной работе нами предложена классификация наиболее распространенных рабочих органов механического принципа действия, основанная на схемах С.Н. Борычева, А.А. Сорокина, Н.Н. Якутина и А.А. Голикова, которая дополнена тенденцией развития вальцевых, барабанных и ротационных сепараторов, а также интенсификаторов и доочистительных устройств [16,30,66,95,112]. Предложенная классификация включает в себя две основные группы рабочих органов:

- рабочие органы, осуществляющие первичную сепарацию;
- рабочие органы, осуществляющие вторичную сепарацию.

В каждую из подгрупп входят вальцевые, прутково-барабанные и ротационные рабочие органы, которые существенно различаются формами, размерами рабочих поверхностей и вариантами исполнений, что указывает на тенденцию их широкого применения и постоянного развития. Поэтому ротационные варианты конструкций сепараторов можно рассматривать как перспективное направление для повышения интенсивности сепарации почвы и производительности картофелеуборочных машин (рисунок 4).

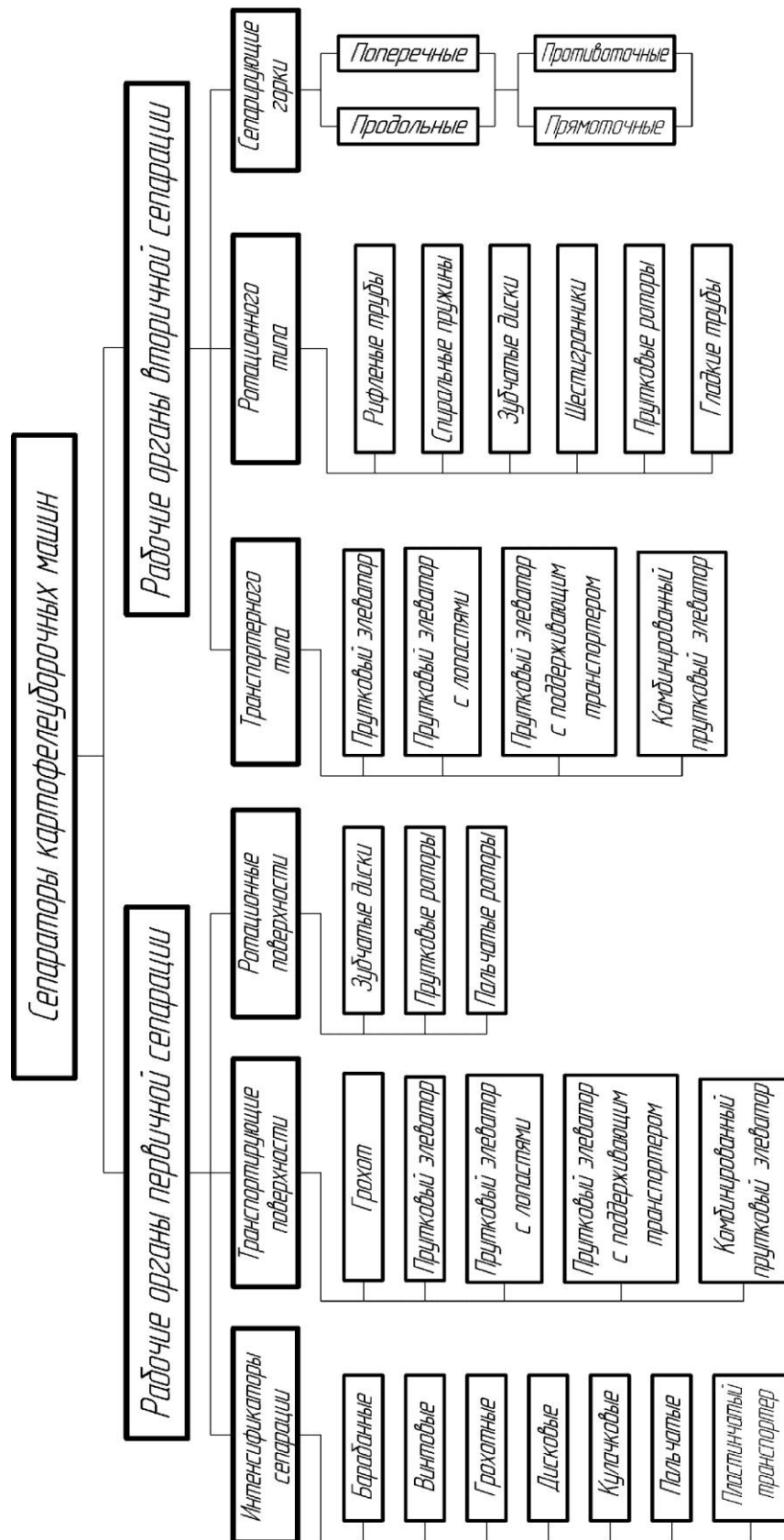


Рисунок 4 – Классификация сепараторов механического принципа действия

Рассмотрим конструктивные особенности и режимы работы наиболее распространенных устройств.

Принцип работы качающихся грохотов, применяемых в картофелеуборочных машинах, основывается на сепарации клубней по размерному признаку. По конструкции грохотные сепарирующие устройства подразделяются на однорешетные и спаренные, а также на горизонтальные, с положительным или отрицательным углом наклона решета. По месту расположения эксцентрикового вала различают грохоты с верхним, нижним и смешанным способом крепления подвесок [37,38,81].

В машинах для уборки картофеля чаще всего используются конструкции, состоящие из последовательно расположенных спаренных решет, с положительным углом наклона и верхним расположением эксцентрикового вала.

Комбинированные сепарирующие устройства, состоящие из колеблющегося грохота с установленным на нём лемехом, получили широкое распространение в небольших однорядных картофелекопателях, которые агрегируются с тракторами тяговых классов 0,6 и 0,9 (рисунок 5).



Рисунок 5 - Однорядный картофелекопатель грохотного типа

За счёт оказываемого динамического воздействия комбинированные устройства лучше подкапывают картофельный пласт. Однако они обладают значительной инерционной неуравновешенностью и энергоемкостью, из-за чего их применение ограничивается лишь небольшими картофелеуборочными машинами.

К основным параметрам сепараторов грохотного типа относятся: угол наклона решет, амплитуда колебаний, частота вращения эксцентрикового вала, размер сепарирующего просвета между прутками, а также длина решет [37,38,81].

Движение картофельного вороха по поверхности грохота осуществляется под углом. Для первого решета его максимальное значение составляет - 20° , для второго - 15° , а для работающих в середине или конце технологического процесса грохотов - 10° . Перемещение компонентов вороха по поверхности решет осуществляется непрерывным подбрасыванием, за счет чего обеспечивается интенсивное выделение сухой не комковатой почвы. Однако в случае сепарации влажной суглинистой почвы сильно уменьшается эффективность просеивания. Анализ рабочих процессов качающихся грохотов, проведенный Н.Ф. Диденко, В.А. Хвостовым и В.П. Медведевым, показал, что наиболее оптимальные значения амплитуды колебаний находятся в диапазоне 0,015...0,025 м. Причем амплитуда 0,015 м применяется лишь для грохотов, работающих в середине или конце технологического процесса. Оптимальная частота вращения эксцентрикового вала устанавливается в зависимости от угла наклона решета и значения амплитуды колебаний, но не более 700 мин^{-1} . Существенное влияние на процесс сепарации оказывает величина просветов решета. Ее значение устанавливается исходя из размеров убираемой культуры. В картофелеуборочных машинах размеры сепарирующих просветов находятся в пределах от 34 до 36 мм [37,38]. Оптимальная длина решет качающихся грохотов напрямую зависит от величины подачи картофельного пласта, т.к. ее увеличение приводит к резкому снижению коэффициента сепарации. Для решет длиной до 1 м оптимальной является подача в диапазоне от 60 до 70 кг/(с·м). Двух решётные грохоты (общей длиной до 2 м) могут работать при подаче 100 кг/(с·м).

Среди всех типов сепарирующих устройств наибольшее распространение получил прутковый элеватор. Он относится к сепараторам просеивающего типа и представляет собой бесконечное решётчатое полотно, образованное прутками различной формы (рисунок 6). К главным достоинствам прутковых элеваторов относятся: простота конструкции, возможность транспортирования материала под углом более 25° , а также низкая степень травмирования убираемой культуры. В отличие от грохотного сепаратора прутковый элеватор может работать на различных типах почвы и убирать не только картофель, но и другие корнеплоды [25,27,36].

Процесс работы картофелеуборочной машины с элеваторным сепарирующим устройством заключается в транспортировании пласта почвы, при котором происходит просеивание мелких частиц через зазоры между прутками. Более крупные примеси разрушаются и сепарируются в месте перехода с одного пруткового элеватора на другой. Для увеличения эффективности выделения почвенных примесей рабочая ветвь полотна колеблется под действием специальных ударных звездочек или встряхивателей (рисунок 6) [51].

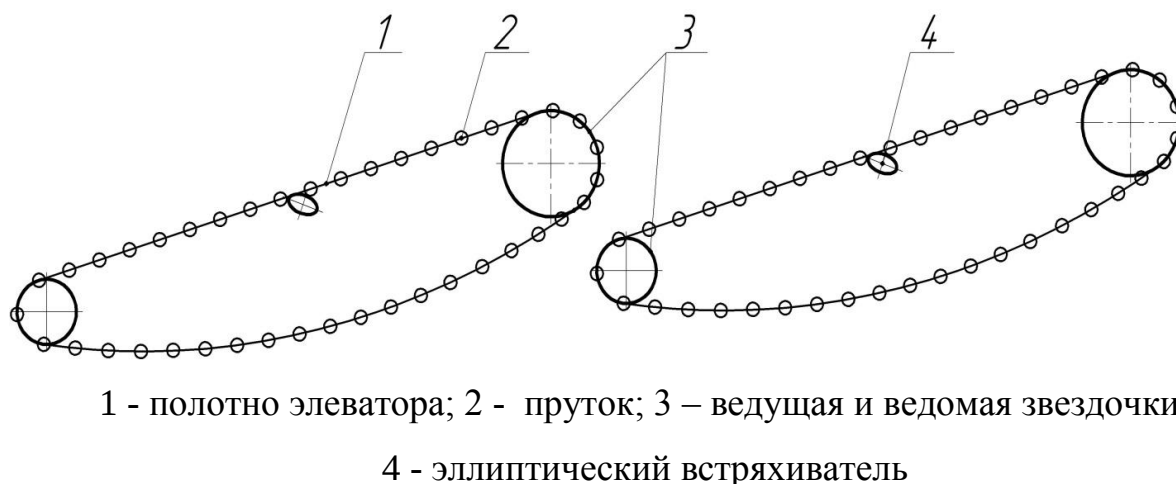


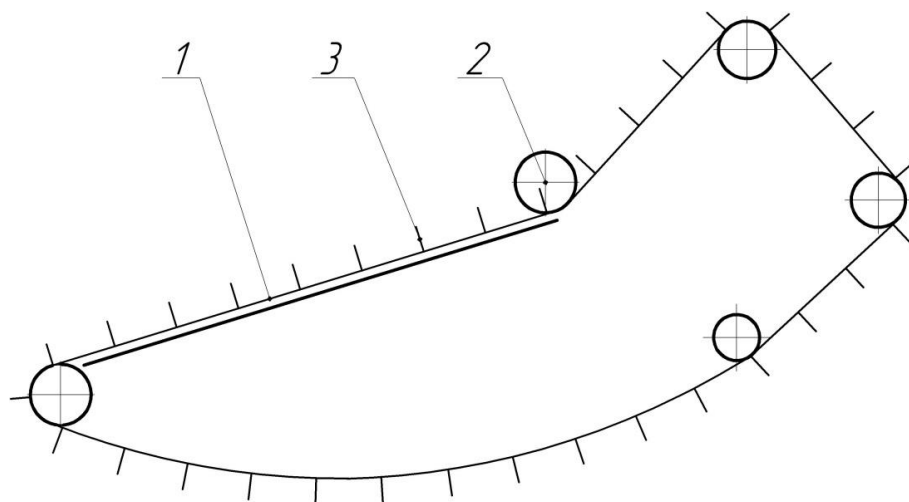
Рисунок 6 – Схема сепаратора элеваторного типа

Рабочий процесс пруткового элеватора определяется его рабочей длиной, скоростью движения и углом наклона полотна к горизонту, а также сепарирующим расстоянием между прутками и типом встряхивателя.

В картофелеуборочных комбайнах длина основного элеватора находится в пределах 2...2,5 м. За счет этого обеспечивается подъем картофельного пласта на требуемую высоту без использования дополнительных поддерживающих устройств. Исследования, проведенные В.М. Алесенко и Г.Д. Петровым, показали, что прутки элеватора при повороте полотна вокруг ролика оказывают сильное динамическое воздействие на пласт. За счёт этого происходит интенсивное разрушение и просеивание почвенных примесей. Экспериментальными исследованиями было установлено, что для данных устройств оптимальная скорость полотна составляет 2...3 м/с [8,81].

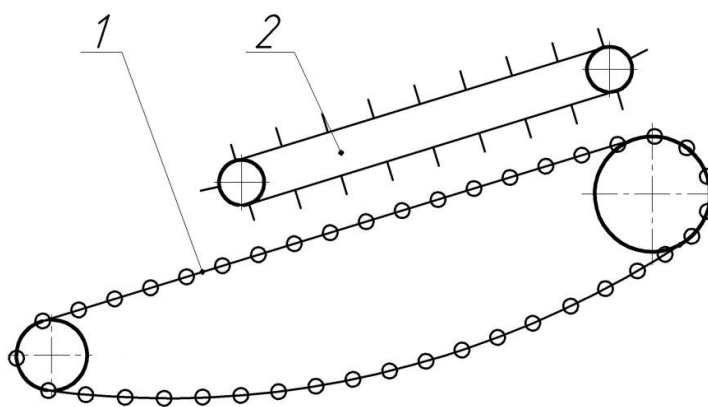
Расстояние между соседними прутками варьируется в пределах от 20 до 28 мм. Уменьшение величины просвета приводит к сохранению части мелких клубней, а также снижает степень травмирования убираемого картофеля [112].

С увеличением угла наклона элеватора его сепарирующая способность снижается [50]. Для полотна с прямыми прутками угол наклона не должен превышать 20° , в противном случае будет происходить скатывание материала вниз. Для подъема пласта на угол $40...45^\circ$ в конструкции элеваторного сепарирующего устройства используют изогнутые в различные стороны прутки, поддерживающие лопасти (устанавливаемые с шагом 150...300 мм) или дополнительный поддерживающий транспортер (рисунки 7, 8).



1 - полотно элеватора; 2 - поддерживающий ролик; 3 - лопасть

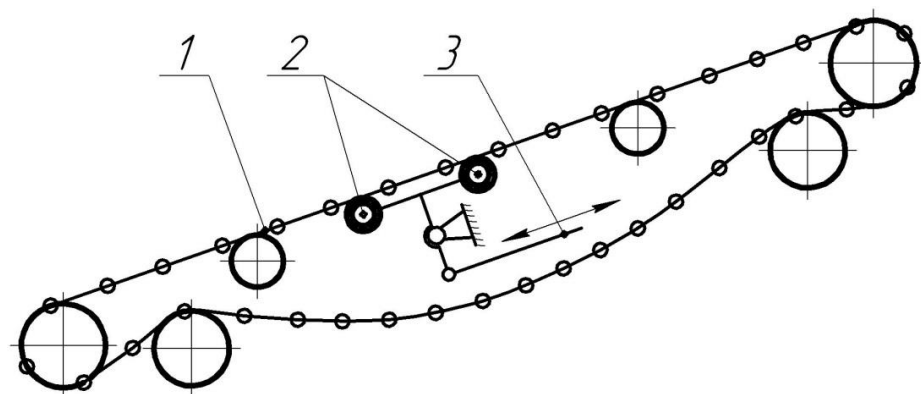
Рисунок 7 – Прутковый элеватор с лопастями



1 - прутковый элеватор; 2 - поддерживающий транспортер

Рисунок 8 – Прутковый элеватор с поддерживающим транспортером

Встряхивание полотна [51,112] приводит к более равномерному распределению картофельного вороха по ширине сепарирующей поверхности и к увеличению полноты отделения примесей (рисунок 9).



1 - прутковый элеватор; 2 – ролики (кулачки); 3 - шатун

Рисунок 9 – Схема пруткового элеватора с регулируемым встряхивателем

В результате проведенного анализа выявили, что основными недостатками элеваторной сепарирующей поверхности являются:

1) Значительная металлоемкость, вызванная тем, что рабочая область составляет только 40% от всей длины сепаратора.

2) Наличие большого количества поверхностей трения и как следствие быстрый износ приводных звездочек и пруткового полотна.

- 3) Высокая энергоемкость, являющаяся следствием пунктов 1 и 2.
- 4) Неравномерное распределение картофельного пласта по ширине сепаратора.
- 5) Снижение сепарирующей способности при влажности почвы менее 11% и более 24% [30].

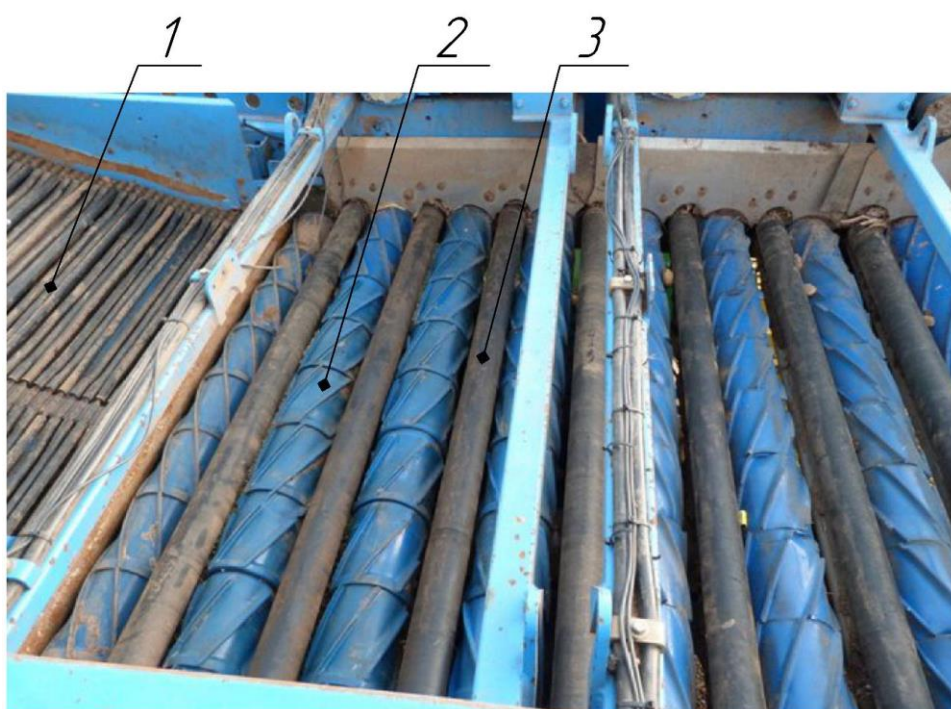
В настоящее время в США и Западной Европе ведутся работы по замене ряда металлических деталей элеватора на изготовленные из композиционных материалов. Предполагается, что за счет этого значительно снизится износ ответственных частей, а также уменьшатся металлоемкость и энергоемкость сепаратора в целом. Также установлено, что применение в составе сепараторов дополнительных интенсификаторов обеспечивает более равномерное распределение картофельного пласта по ширине, а также увеличивает сепарирующую способность элеватора.

В настоящее время ротационные сепараторы все чаще используются в картофелеуборочных машинах. Они обычно представляют собой набор параллельно расположенных и вращающихся в одном направлении валов, на которые устанавливаются цилиндрические гладкие и рифленые трубы, спиральные пружины, прутковые роторы, диски различной формы, многогранники и звездочки. За счет вращательного движения и рифленой поверхности ротационных рабочих органов картофелесодержащий пласт равномерно распределяется по всей ширине сепарирующей поверхности, тем самым обеспечивается интенсивное просеивание примесей. Рассмотрим ротационные сепарирующие устройства, получившие наибольшее распространение в картофелеуборочных машинах.

В США и Западной Европе широко применяются картофелекопатели и картофелекопатели-погрузчики с элеватором в качестве первичного сепаратора и рифлеными трубами, спиральными пружинами, прутковыми роторами в качестве вторичного сепаратора [54,78]. Причем длина данных ротационных рабочих органов всегда равняется ширине пруткового элеватора, в комплексе с которым

они работают. Таким образом обеспечивается максимальная сепарирующая способность картофелеуборочной машины.

Одним из таких примеров является сепаратор картофелекопателя-погрузчика Английской компании «STANDEN-PEARSON» модели «T2» (рисунок 10). Его основное сепарирующее устройство состоит из двух прутковых элеваторов 1. Регулируемый зазор между первым и вторым элеватором позволяет оптимизировать рабочий процесс картофелекопателя под конкретные условия [78].



1 – прутковый элеватор; 2 – рифленая труба; 3 – гладкая труба

Рисунок 10 – Вторичный ротационный сепаратор «Омега»

Вторичный ротационный сепаратор «Омега» образован восемью рифлеными 2 и восемью гладкими 3 трубами, установленными поочередно (рисунок 10). Основными параметрами, определяющими процесс его работы, являются: угол наклона сепарирующей поверхности, диаметр рабочих органов и скорость их вращения, а также размер сепарирующего просвета между трубами. Как и все сепараторы, образованные гладкими или рифлёными валами, «Омега» в

основном устанавливается в горизонтальном положении, т.к. в противном случае в процессе работы происходит сгуживание картофелесодержащей массы. Диаметр рифлёных и гладких труб составляет 160 мм и 110 мм соответственно. Размер сепарирующего просвета равняется 25 мм, что позволяет сохранить клубни мелкой фракции [78].

Сепарирующая способность «Омеги», степень повреждения клубней и скорость перемещения картофелесодержащей массы напрямую зависят от скорости вращения рабочих органов. С ее ростом повышается просеиваемость почвы, степень повреждения клубней и скорость движения картофелесодержащей массы.

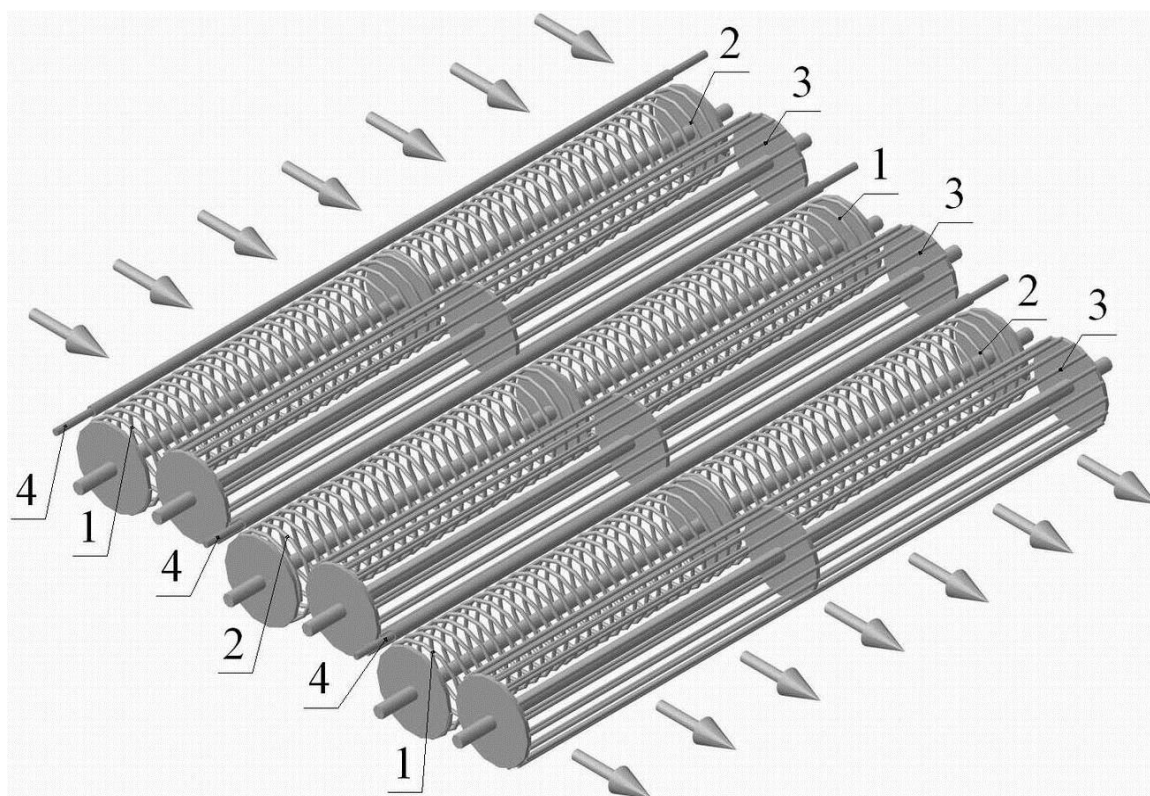
Рабочие органы в виде рифленых или гладких труб частично подвержены залипанию почвой и наматыванию ботвой. Это отрицательно сказывается на эффективности работы и приводит к тому, что при повышенной влажности перемещение картофелесодержащего вороха происходит за счет подпора массы, поступающей с элеватора.

В картофелеуборочной технике рабочие органы в виде спиральных пружин в основном используются только в комплексе с сепараторами элеваторного типа. В процессе работы таких устройств частично очищенный ворох поступает на пружинную сепарирующую поверхность, где под действием динамических сил происходит окончательное разрушение почвенных комков, просеивание примесей и перемещение материала к выгрузному устройству.

При машинной уборке картофеля на полях с суглинистой или глинистой почвой повышенной влажности эффективность работы пружинного сепаратора снижается, а степень травмирования клубней увеличивается. Для решения этой проблемы А.Г. Максимовым был предложен комбинированный сепаратор, состоящий из чередующихся спиральных пружин и прутковых роторов (рисунок 11) [54]. По сравнению с пружинами прутковый ротор лучше разрушает почвенные комки, но обладает низкой просеивающей способностью и сильнее травмирует клубни.

Процессы перемещения и сепарации картофелесодержащего вороха комбинированной ротационной сепарирующей поверхностью в основном зависят от диаметров и частоты вращения рабочих органов, размера сепарирующих просветов между прутками ротора, скорости движения картофелеуборочной машины и влажности почвы [54].

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что рациональное значение внешних диаметров пружин и прутковых роторов составляет 200 мм. Величина сепарирующих просветов прутковых роторов была выбрана исходя из минимального размера товарного клубня, т.е. равной 25 мм [54].



- 1, 2 – спирали с левой и правой навивкой; 3 – прутковый ротор;
4 – ограничительный прут (стрелками показано направление движения картофельного вороха)

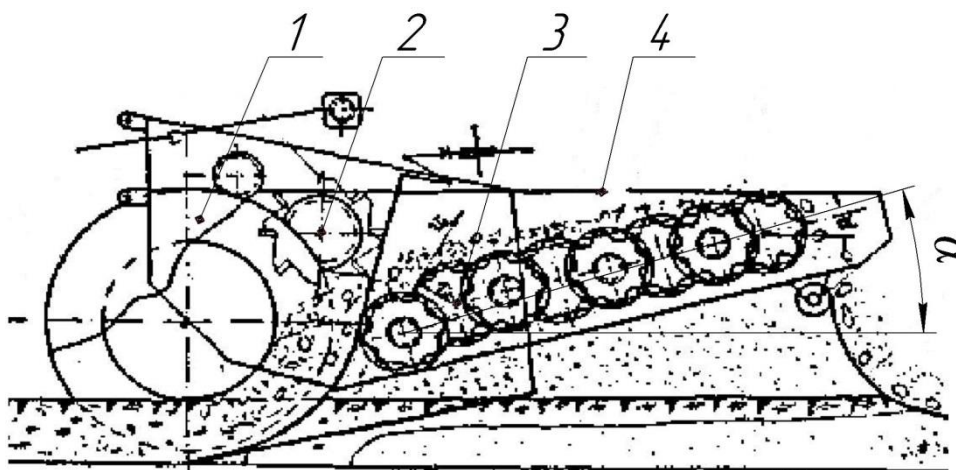
Рисунок 11 – Схема ротационного комбинированного сепаратора

Согласно [54] с ростом скорости движения картофелеуборочной машины увеличивается и уровень подачи картофелесодержащего вороха. Вследствие этого у комбинированного сепаратора происходит существенное снижение просеиваемости примесей. Так полнота сепарации 96,8%, при скорости движения 1,89 км/ч, достигается при частоте вращения рабочих органов 185 мин⁻¹. В тоже время при скорости 3,22 км/ч максимальная полнота сепарации (90%) приходится на частоту вращения рабочих органов 155 мин⁻¹.

Степень травмирования клубней ротационным комбинированным сепаратором возрастает с повышением частоты вращения рабочих органов. Наибольшая повреждаемость приходится на режимы, обеспечивающие наилучшую просеиваемость. При скорости движения 3,22 км/ч и частоте вращения 155 мин⁻¹ повреждаемость клубней составляет 1%, а при скорости 1,89 км/ч и частоте вращения 185 мин⁻¹ равняется 2,1%. Это связано с тем, что повышение интенсивности воздействия рабочих органов на картофелесодержащий ворох снижает амортизирующую способность почвенных примесей [54].

При работе на тяжелых суглинистых почвах в условиях повышенной влажности рабочие органы комбинированного сепаратора подвержены залипанию почвой, а из-за небольшого диаметра (200 мм) и маленькой окружной скорости на них наматываются растительные остатки.

Исследования работы зубчатых дисков (звездочек), проведенные Я.И. Верменко, показывают, что такие рабочие органы могут использоваться как в основном, так и во вторичном сепараторе (рисунок 12) [23]. Они обладают более высокой транспортирующей и сепарирующей способностью, по сравнению с устройствами, состоящими из гладких, рифленых валов или спиральных пружин.



1 – подкапывающее устройство; 2 – барабанный комкодавитель;

3 – ротационный сепаратор; 4 - рама

Рисунок 12 – Картофелекопатель КДН-2 с ротационным сепаратором

Разработанный Я.И. Верменко картофелекопатель КДН-2 состоит из подкапывающего устройства 1, барабанного комкодавителя 2 и ротационного сепаратора 3, которые установлены на раме 4 (рисунок 12). Каждый вал снабжен зубчатыми рабочими органами в количестве от 29 до 30 дисков, с просветами между ними в 30 мм. Диски соседних секций располагаются в шахматном порядке относительно друг друга [23].

На процесс работы зубчатых дисков существенное влияние оказывают следующие факторы: угол наклона сепаратора, окружная скорость рабочих органов и уровень подачи клубненосного пласта.

Экспериментальные исследования показали, что увеличение угла наклона ротационного сепаратора с 10° до 25° , при средней окружной скорости рабочих органов 1...2,5 м/с, приводит к росту просеиваемости почвы. Однако в этих условиях степень повреждения клубней увеличивается примерно в 1,5...2 раза (рисунок 13). Поэтому угол наклона данного сепаратора регулируется в пределах от 10° до 15° [23].

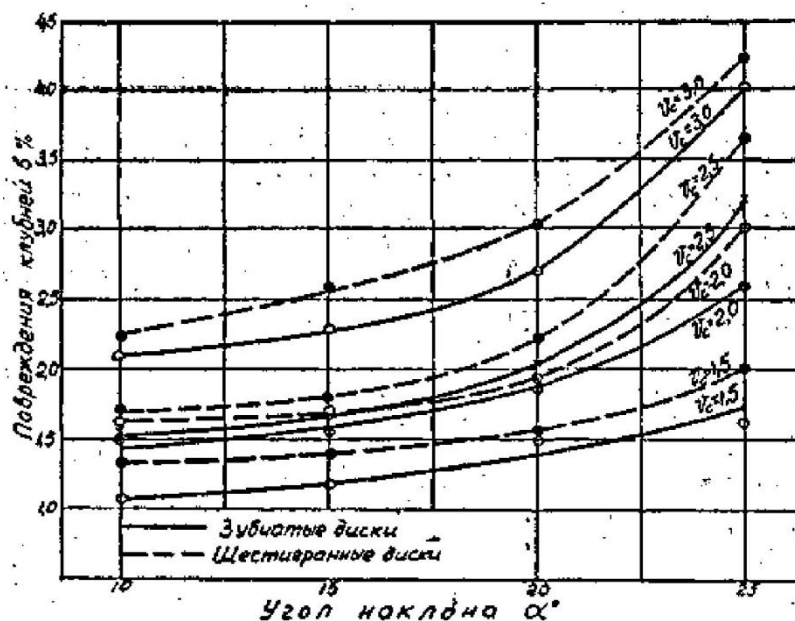
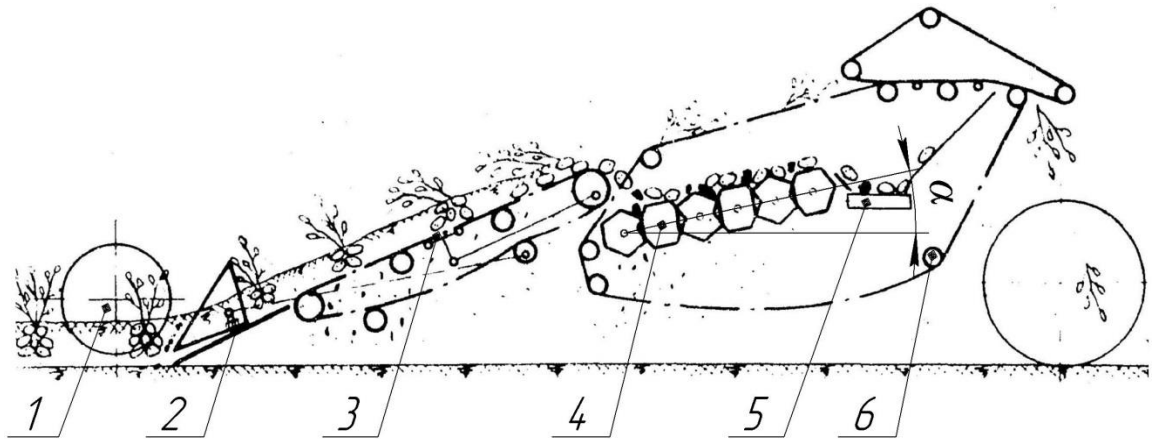


Рисунок 13 – График зависимости повреждения клубней картофеля от угла наклона сепаратора

В результате исследований рациональная окружная скорость зубчатых дисков (звездочек) была определена в пределах от 1,5 до 2,5 м/с. При скорости более 3 м/с степень травмирования клубней значительно превышает значения, допускаемые агротехническими требованиями. Наиболее сильное влияние на просеивание почвы оказывает длина сепарирующей поверхности. Экспериментальные исследования ротационного сепаратора, проведенные Я.И. Верменко на супесчаных почвах при влажности 8...11%, показали, что минимальное количество непросеянной почвы в сходе наблюдалось при использовании 8 секций сепаратора [23].

Сепарирующие поверхности, образованные рабочими органами в форме шестигранных дисков, в основном используются как устройства вторичной сепарации. И.Н. Масленковым была предложена конструктивная схема картофелекопателя-валкоукладчика включающая: вертикальные ножи 1, лемехи 2, прутковый элеватор с регулируемым встряхивателем 3, ротационный сепаратор 4, выгрузной транспортер 5 и ботвоудаляющее устройство 6 (рисунок 14) [57].



- 1 – вертикальный нож; 2 – лемех; 3 – прутковый элеватор;
 4 – ротационный сепаратор; 5 – выгрузной транспортер;
 6 – ботвоудаляющее устройство

Рисунок 14 – Конструктивная схема картофелекопателя-валкоукладчика с ротационным сепаратором

Результаты исследований, проведенных Я.И. Верменко и И.Н. Масленковым, показали, что по характеру работы шестигранные диски практически не отличаются от рабочих органов в виде звездочек [23,57]. На перемещение картофелесодержащей массы по таким сепараторам наибольшее влияние оказывают: окружная скорость рабочих органов, угол наклона сепаратора и уровень подачи почвы.

Основными недостатками ротационных сепараторов, состоящих из рабочих органов в виде звездочек и шестигранных дисков, являются низкая транспортирующая и сепарирующая способность, а также высокая повреждаемость клубней при работе на полях с суглинистыми почвами повышенной влажности. К тому же из-за небольшого внешнего диаметра и низкой окружной скорости на них будут наматываться растительные остатки.

Исследованием рабочих процессов картофелекопателей с сепараторами, состоящими из прутковых роторов, занимались И.И. Попов и Д.А. Федоров. Ими было установлено, что просеивающая способность данных устройств в основном зависит от внешнего диаметра и частоты вращения рабочих органов, а

также от угла наклона и длины рабочей поверхности, сепарирующего расстояния между прутками и скорости движения агрегата. На процесс перемещения клубней по прутковым роторам наибольшее влияние оказывают частота вращения, радиус и форма роторов [85,105].

Экспериментальные исследования, проведенные И.И. Поповым, показали, что с увеличением частоты вращения прутковых роторов возрастает и полнота отделения клубней [85]. При значении 400 мин^{-1} происходит 100% сепарирование поступившей на ротор массы. Однако при таком режиме степень травмирования клубней превышает значения, допускаемые агротехническими требованиями. Поэтому диапазон оптимальных величин частоты вращения находится в пределах от 250 до 400 мин^{-1} . Полнота отделения в этом случае составляет от 97% до 100% при повреждаемости менее 3%.

Ротационный сепаратор, предложенный И.И. Поповым, состоит из трёх роторов, каждый из которых включает в себя по три диска диаметром 150 мм (рисунок 15). На этих дисках установлены прутки диаметром 10 мм, с шагом по окружности 30 мм. Расстояние между соседними роторами не превышает 25 мм [85].

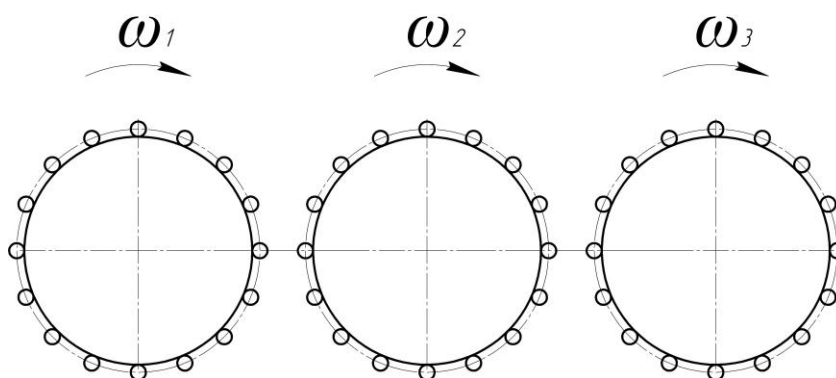
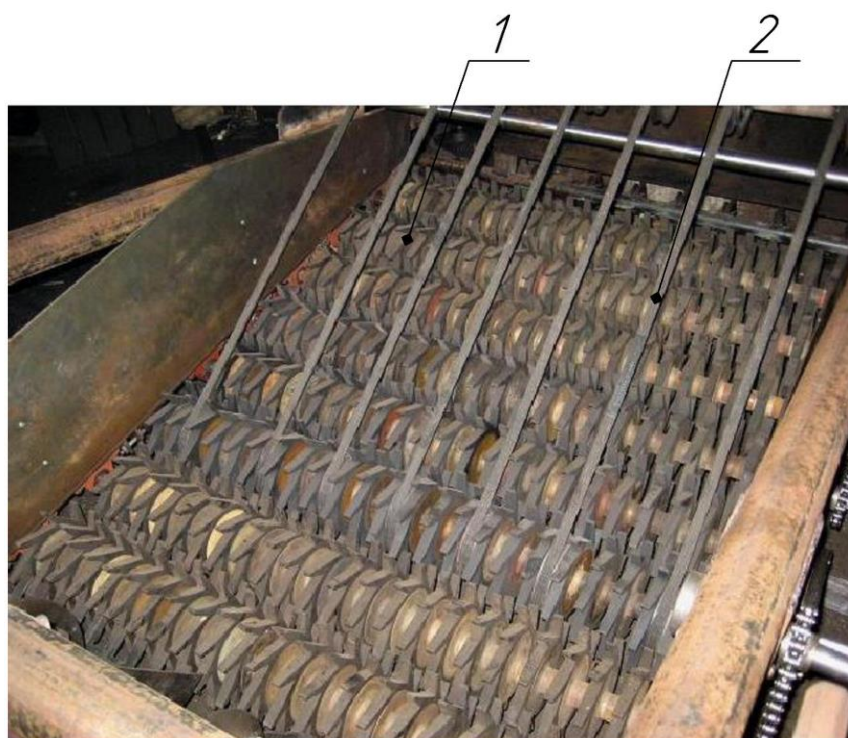


Рисунок 15 – Ротационный сепаратор с прутковыми роторами

И.И. Попов и Д.А. Федоров определили, что взаимодействие клубней с первым ротором происходит через слой почвы, который принимает на себя до 90% ударной нагрузки. На втором роторе до 60% клубней подвергаются

контактному удару, из-за чего значительно увеличивается вероятность повреждения. При перемещении по третьему ротору почвенные примеси практически не защищают клубни от ударных воздействий, из-за чего они сильно травмируются. [85,105].

В ФГБОУ ВПО «Иркутская ГСХА» С.С. Остроумовым был создан и испытан картофелекопатель с ротационной сепарирующей поверхностью [74]. В качестве рабочих органов для данного сепаратора используются пальцевые роторы 1, изготовленные из резины. Они располагаются в шахматном порядке и с перекрытием пальцев роторов соседних валов 20 мм. Внешний диаметр пальцевых дисков составляет 200 мм. Причем, сечение пальца уменьшается от основания к вершине. Количество валов может изменяться (в зависимости от условий работы) от 4 до 8 штук (рисунок 16) [72].



1 – пальцевый ротор; 2 - ботвоудалитель

Рисунок 16 – Ротационный сепаратор почвы
с резиновыми пальцевыми роторами

Согласно [71,72,74] конструкция роторной сепарирующей поверхности обеспечивает интенсивное просеивание почвы при мягком воздействии на клубни картофеля. Форма пальцевых роторов 1 предохраняет рабочую поверхность от залипания почвой, а их расположение практически исключает возможность защемления клубней в сепарирующих просветах. Перед сепаратором (для интенсификации сепарирующей способности картофелекопателя) над лемехом был установлен барабан-комкодаватель, а для удаления растительных примесей используется ботвоудалитель 2, состоящий из 7 ремней (рисунок 16).

С.С. Остроумов установил, что наибольшее влияние на эффективность работы роторного сепаратора оказывают: частота вращения пальцевых роторов, угол подъема и длина сепарирующей поверхности. Результаты опытов показали, что оптимальный диапазон частоты вращения роторов находится в пределах от 80 до 90 мин^{-1} , при этом полнота отделения клубней напрямую зависит от угла подъема сепарирующей поверхности (рисунок 17) [71].

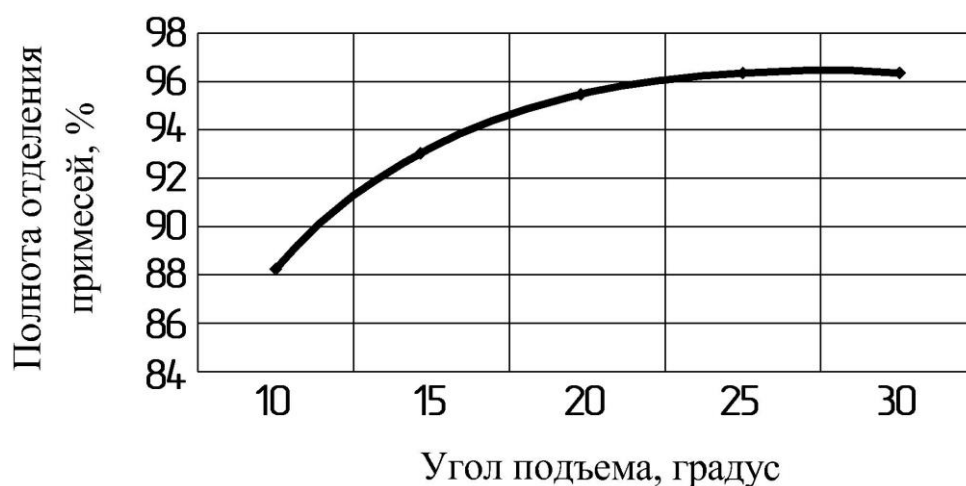


Рисунок 17 – График зависимости полноты отделения примесей от угла подъёма сепаратора

Из графика (рисунок 17) видно, что полнота отделения клубней растёт с увеличением угла наклона сепарирующей поверхности. Однако при угле наклона 25° клубни начинают скатываться вниз, снижая тем самым скорость

транспортирования и увеличивая количество соударений. Поэтому угол наклона роторного сепаратора устанавливается в пределах от 15° до 20° .

Полученные в работе [71,74] зависимости полноты отделения примесей и повреждаемости клубней от длины сепарирующей поверхности показывают, что максимальное отделение примесей (95%), при допустимой степени травмирования (0,5%), происходит при длине сепарирующей поверхности 1100 мм.

На основании проведенных аналитических исследований сделали вывод, что наиболее перспективным направлением является разработка и совершенствование сепарирующих устройств на основе активных рабочих органов, в том числе пальцевых роторов. Они показали хорошие результаты при уборке картофеля на полях с легкими и средними почвами. Их форма и расположение снижают вероятность защемления клубней и комков, а также наматывание растительных остатков и залипание впадин (между соседними пальцами) почвой. За счет активного действия роторов достигается 85% отделение примесей при допустимой степени травмирования клубней. В тоже время обзор показал недостаточную степень исследования рабочих процессов ротационных сепараторов в направлении повышения их эффективности и надежности при сепарации значительных объемов влажной суглинистой почвы, а также для снижения энергоемкости картофелеуборочных машин в целом. Результаты обзора указывают на необходимость поиска новых конструктивных решений по компоновке сепараторов ротационного типа в виде комбинированных конструкций, работающих совместно с интенсификаторами сепарации и обладающих способностью изменения режимов вращения рабочих органов и сепарирующих зазоров, для обеспечения щадящего взаимодействия с клубнями в любых условиях уборки.

1.3 Обзор конструкций интенсификаторов сепарации

Интенсификаторы сепарации представляют собой устройства, которые устанавливаются в дополнение к основному сепарирующему рабочему органу картофелеуборочной машины. Они предназначены для подачи и равномерного распределения компонентов картофельного пласта по ширине сепаратора, а также оказывают на них дополнительное динамическое воздействие для интенсификации процесса сепарации. Интенсификаторы применяются в комплексе с прутковыми элеваторами, реже с качающимися грохотами. Это обусловлено низкой сепарирующей способностью данных устройств, особенно при работе на глинистых и суглинистых почвах с влажностью менее 11% и более 24%. В данных условиях разрушение структуры подкопанного пласта приводит к образованию большого количества прочных почвенных комков, которые подаются на сепаратор и имеют такие же размеры, что и клубни. Всё это затрудняет их просеивание через сепарирующие просветы качающихся грохотов и прутковых элеваторов. Интенсификаторы до настоящего времени практически не применялись вместе с ротационными сепарирующими устройствами.

По конструкции интенсификаторы подразделяются на гидравлические, пневматические и механические. Последние являются наиболее простыми, надежными, а также достаточно эффективными, за счёт чего они и получили наиболее широкое распространение.

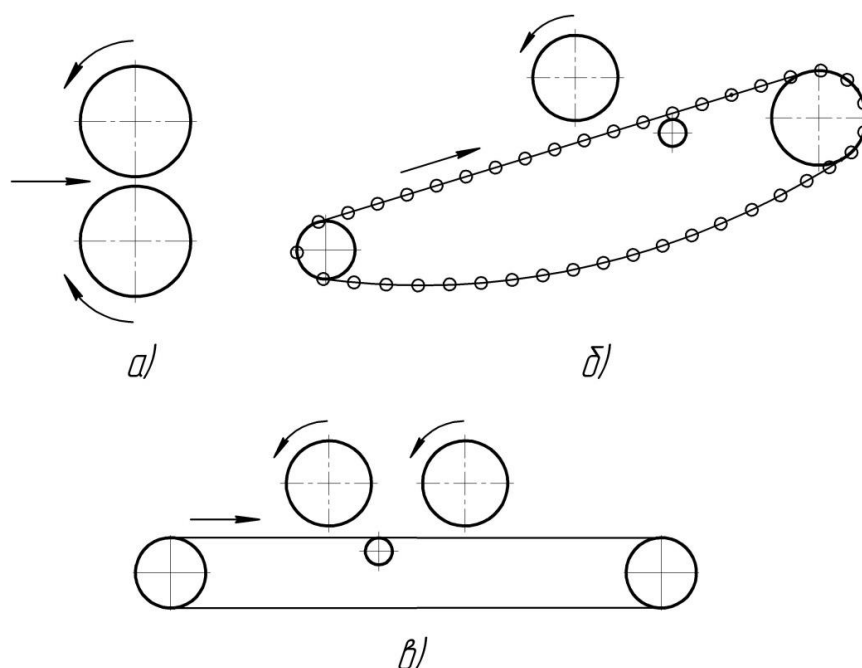
Многие учёные, в том числе В.М. Алесенко, С.Н. Борычев, В.В. Воронков, Н.Ф. Диденко, И.П. Ксенович, В.П. Медведев, В.А. Хвостов и другие, особенно выделяли конструкции барабанного типа. Они не только являются самым распространённым и эффективным видом интенсификаторов, но также применяются для предварительного разрушения комков в рядках [8,16,25,37,38,44,92].

Основными методами разрушения клубненосного пласта барабанными интенсификаторами являются сжатие (статическое нагружение) и ударная нагрузка (динамическое нагружение). Разрушение клубненосного пласта методом

статического нагружения происходит за счёт значительного усилия прессования [8]. Таким образом работают интенсификаторы баллонного типа (рисунок 18).

Основу каждого баллона составляют вал с опорными подшипниками, камеры и покрышки [37]. В картофелеуборочных машинах они устанавливаются перед, над и после сепаратора. Существует несколько основных схем компоновки данных рабочих органов: спаренные баллоны, сочетание баллонов с ленточным транспортером или с прутковым элеватором (рисунок 18).

К основным параметрам пневматических баллонов, влияющим на эффективность разрушения почвенных комков, относятся: внешний рабочий диаметр, давление воздуха в баллоне, величина рабочего просвета между баллонами, окружная скорость, скорость подачи пласта, а также их общее число [16,81].



a – спаренные пневматические баллоны; *б* – сочетание баллонов с прутковым элеватором; *в* – сочетание баллонов с ленточным транспортером

Рисунок 18 – Схемы компоновки баллонных интенсификаторов

Исследования Г.Д. Петрова показали, что для обеспечения устойчивости процессов приема, перемещения и разрушения компонентов картофельного

вороха спаренными баллонами (вальцами) их внешний диаметр должен быть не менее 300 мм. В противном случае составляющая силы трения в месте раствора баллонов будет меньше составляющей выталкивающей касательной силы, что приведет к сгуживанию обрабатываемого материала перед интенсификатором. В тоже время минимальный внешний диаметр баллонов, применяющихся вместе с прутковым или ленточным транспортером, составляет всего 210 мм [16,81].

Исследования процесса разрушения почвенных комков статическим сжатием показали, что усилия, требуемые для раздавливания комков среднего и тяжелого суглинков, могут достигать 350 Н. В тоже время допустимая сжимающая нагрузка на клубень находится в пределах 200...250 Н. Поэтому, для того чтобы средняя сила сжатия компонентов вороха пневматическими баллонами не превышала 200 Н, давление в баллонах должно находиться в диапазоне от 15 до 25 КПа [16,81].

Величина зазора между рабочими органами данных интенсификаторов устанавливается равной среднему размеру убираемого корнеплода.

На процесс разрушения почвенных комков большое влияние оказывает окружная скорость баллонов. При скорости 5 м/с количество разрушенных комков достигает 94,6%, а при 1,5 м/с - 76,7% (вариант компоновки показан на рисунке 18, в). Однако при 5 м/с происходит сильное травмирование убираемых корнеплодов. Поэтому максимальная окружная скорость баллонов обычно не превышает 3 м/с [16,81].

На эффективность работы интенсификатора сильное влияние также оказывает число баллонов. При окружной скорости 3 м/с одним баллоном разрушается до 43,9% почвенных комков, однако при двукратном воздействии это значение увеличивается до 85,7%. Вследствие этого наибольшее распространение получили конструкции с двумя или тремя баллонами, установленными над ленточным или прутковым транспортером [37].

Экспериментальные исследования показали, что интенсификаторы баллонного типа эффективно функционируют при подаче материала не более 15

кг/с [81]. Для достижения этого необходимо, чтобы основной сепаратор отсеивал до 80% подкапываемой почвы.

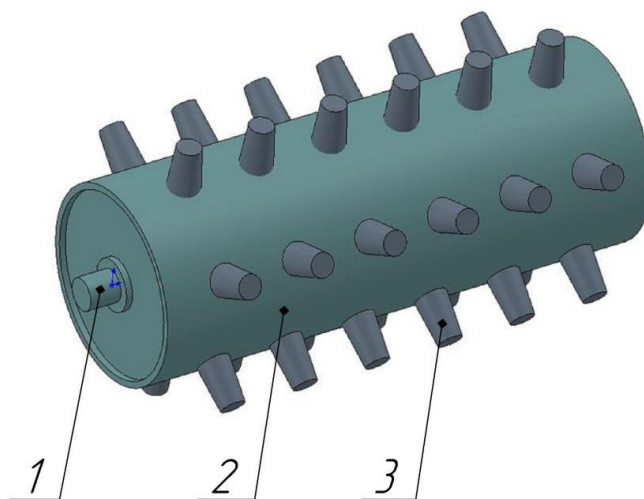
В настоящее время широко распространены интенсификаторы разрушающие пласт различными видами динамического (ударного) нагружения. По сравнению со статическим нагружением разрушение пласта данными методами происходит при меньших нагрузках [8]. Это является следствием высокого предела прочности почвы на сжатие, который в 10...30 раз больше, чем предел прочности на разрыв.

Наиболее распространенным интенсификатором, разрушающим пласт ударным нагружением, является битер. В большинстве случаев он устанавливается между лемехами и элеватором. В данном случае применение существенных динамических нагрузок не приводит к увеличению степени травмирования клубней, находящихся в слое пласта почвы [25].

По типу рабочей поверхности битеры подразделяются на:

- штифтовые,
- прутковые,
- лопастные.

Штифтовой битер включает в себя приводной вал 1, цилиндрическое основание 2 и ударные элементы различной конструкции 3 (рисунок 19). Среди последних наибольшее распространение получили конусообразные, подвижные и пальчатые штифты. Рабочий процесс такого битера зависит от скорости движения картофелеуборочной машины, частоты вращения приводного вала, внешнего диаметра и высоты пальцевых ударников, а также от расположения оси вала относительно задней кромки лемехов [16].



1 - приводной вал; 2 - цилиндрическое основание; 3 - штифт

Рисунок 19 - Штифтовой бита

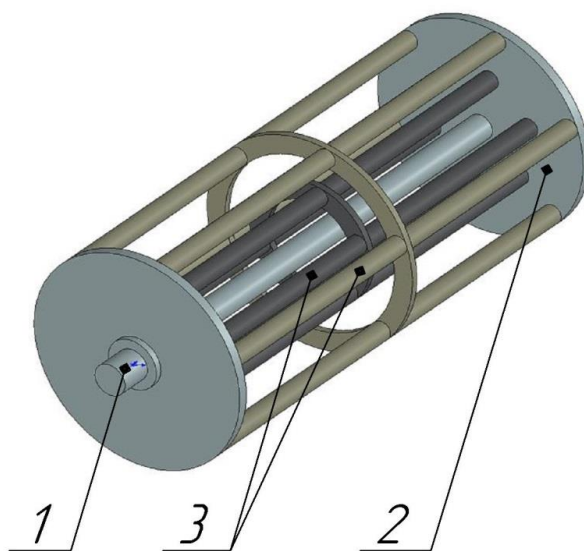
Транспортирующая способность штифтового бита напрямую зависит от его окружной скорости. Для исключения сгуживания она должна быть выше скорости поступающего картофелесодержащего пласта. Экспериментальные исследования показали, что для достижения минимально необходимой окружной скорости бита, при средней скорости движения картофелеуборочной машины $0,8 \text{ м/с}$, частота вращения приводного вала бита должна составлять не менее 320 мин^{-1} . При 560 мин^{-1} происходит почти полное разрушение почвенных комков, однако потери клубней достигают 7%. Из-за небольшого радиуса ударников штифтовой бита проникает в почвенный пласт на значительную глубину (до 80 мм), что в свою очередь приводит к высокой степени травмирования клубней до 50%. С подъемом оси приводного вала относительно задней кромки лемехов травмирование клубней также увеличивается. Вследствие этого штифтовые биты не получили широкого распространения в картофелеуборочных машинах [8,16].

Конструкция пруткового бита включает в себя приводной вал 1, основание 2 и прутки 3, которые располагаются в один или два ряда (рисунок 20) [16,25]. Рабочий процесс пруткового бита также зависит от скорости движения картофелеуборочной машины, окружной скорости, внешнего радиуса, площади

контакта и расположения оси вращения приводного вала относительно задней кромки лемехов.

В процессе работы прутковый битер вращается с окружной скоростью в пределах от 6,4 м/с до 6,5 м/с, тем самым оказывает значительное динамическое воздействие на нижнюю (наиболее плотную) часть пласта, где при ударе происходит расслоение почвы. Из-за небольшого радиуса ударные элементы полностью погружаются в картофельный пласт. Нижние слои начинают двигаться с большей скоростью, чем верхние. При этом клубни и камни выталкиваются на поверхность ударниками битера [16,25]. За счет этого снижается повреждаемость картофеля и увеличивается сепарирующая способность пруткового битера.

Расположение оси вращения вала пруткового битера в плоскости лемеха или выше нее приводит к тому, что горизонтальная составляющая скорости его соударения с подкопанной грядкой смещается в сторону, противоположную направлению движения машины.



1 - приводной вал; 2 - основание; 3 - прутки

Рисунок 20 – Двухрядный прутковый битер

Из-за этого увеличивается угол контакта прутка битера с транспортируемым слоем, а направление скорости соударения становится поперек пласта. Все это

увеличивает интенсивность разрушения почвенных примесей. Однако при влажности почвы более 22% происходит залипание прутков второго контура. Из-за этого существенно снижается сепарирующая и транспортирующая способность бitera. Для уменьшения повреждаемости клубней все чаще применяют прутки с эластичным покрытием.

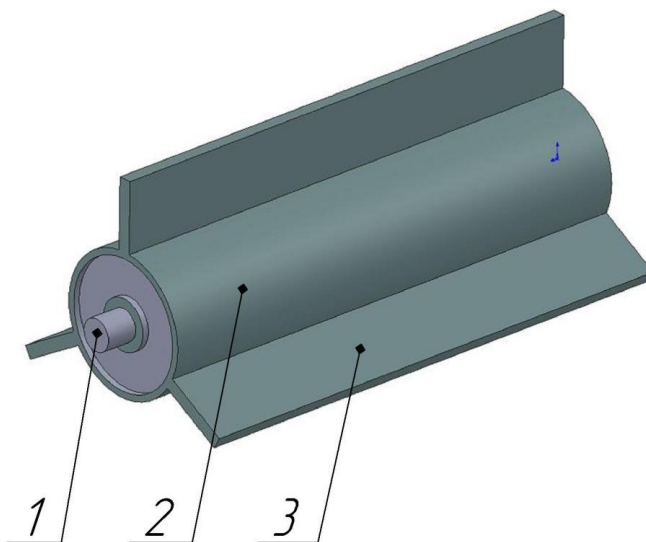
Сравнительный анализ показал преимущество пруткового бitera перед штифтовым. Однако сложность конструкции и достаточно высокая степень травмирования клубней (до 12%), а также снижение сепарирующей способности бitera в результате его залипания почвой ограничили применение прутковых битеров в картофелеуборочных машинах.

Лопастные битеры, из-за своей простоты и универсальности применения, получили наибольшее распространение в картофелеуборочной технике. В модернизированных картофелекопателях типа КСТ-1,4М, КТН-2ВМ и др. они используются для предварительного разрушения клубненосного пласта, его подачи и равномерного распределения по ширине элеватора [25,43,94].

На работу лопастного бitera, аналогично предыдущим конструкциям, наибольшее влияние оказывают следующие факторы: скорость движения картофелеуборочной машины, частота вращения приводного вала, а также внешний диаметр и форма лопастей самого бitera.

С изменением скорости движения картофелеуборочной машины изменяется и толщина слоя поступающего на бiter. Установлено, что она не должна превышать длину лопасти, т.к. в противном случае будет происходить сгруживание картофелесодержащего вороха. Транспортирующая способность лопастного бitera в основном определяется его окружной скоростью. Ее значение всегда должно превышать скорость движения картофелеуборочной машины. В центральном научно-исследовательском институте механизации и электрификации сельского хозяйства нечернозёмной полосы «ЦНИИМЭСХ» были проведены теоретические и экспериментальные исследования рабочих процессов трехлопастного цилиндрического бitera, состоящего из приводного вала 1, цилиндрического основания 2 и лопастей 3 (рисунок 21) [8].

Опыты проводились на средних суглинистых почвах при влажности 14,5...16,1%. Они показали, что при скорости движения копателя 0,8 м/с оптимальная частота вращения трехлопастного цилиндрического бitera составляет 220 мин^{-1} . При данном значении происходит не только устойчивое перемещение, но и интенсивное разрушение структуры картофелесодержащего пласта, причем количество комков в сходе не превышает 4%. При частоте вращения трехлопастного цилиндрического бitera 560 мин^{-1} и скорости движения экспериментальной установки 0,8 м/с происходило практически полное (98%) разрушение почвенных комков. Однако степень травмирования клубней увеличилась до 17% [8].



1 - приводной вал; 2 – цилиндрическое основание; 3 - лопасть

Рисунок 21 – Трехлопастной цилиндрический бите

Как показали экспериментальные исследования [8,25,94] наиболее оптимальные значения максимального и минимального диаметров бitera находятся в пределах 280...350 мм, при частоте вращения бitera $320...560 \text{ мин}^{-1}$ и скорости движения машины 0,8...1,6 м/с. Причём при значениях частоты вращения бitera выше 420 мин^{-1} изменение количества лопастей не приводило к увеличению или уменьшению интенсивности разрушения структуры пласта.

В большинстве случаев ось вращения лопастного битера находится на одной высоте с задней кромкой лемеха. Исследования показали, что при расположении оси вращения битера выше плоскости лемехов происходит сгуживание картофелесодержащего вороха.

По сравнению со штифтовыми и прутковыми бiteraми лопастной бiter обладает наилучшей транспортирующей способностью. Большой радиус ударных элементов позволяет ему производить практически полный продольно-поперечный разрез картофельного пласта, вследствие чего его перемещение происходит частями [43]. За счет этого снижается повреждаемость клубней и увеличивается интенсивность разрушения структуры подкопанной гряды. Проведенные исследования [43] также показали, что среди всех типов бiterов именно лопастной обладает наименьшей просеивающей способностью.

1.4 Выводы

В результате аналитического обзора конструкций и режимов работы сепараторов и интесификаторов картофелеуборочных машин предложена гипотеза о перспективности совершенствования картофелекопателя путем совмещения в его конструкции приемно-подающего лопастного битера и ротационного сепаратора, с целью повышения сепарирующей эффективности и снижения энергоемкости. Для этого планировали провести исследования по усовершенствованию конструкции лопастного битера, предназначенного для приема, предварительного разрушения и устойчивой подачи картофельного пласта на первый вал ротационного сепаратора. Также планировали выполнить обоснование новой конструкции и схемы размещения роторов сепаратора, определить их рациональные режимы вращения, которые позволят повысить интенсивность сепарации суглинистой почвы и производительность картофелекопателя в целом, а также снизят его энергоемкость и повреждаемость клубней.

Исходя из вышесказанного, мы сделали следующие выводы:

- сепарирующие устройства транспортерно-просеивающего и грохотного типов не в достаточной степени обеспечивают эффективность выделения суглинистых почв в сложных почвенно-климатических условиях производства картофеля в Нечерноземной зоне РФ и в Калужской области в частности;

- сепараторы, состоящие из пальцевых роторов, трубчатых или фигурных вальцов, обладают более высокой разрушающей и просеивающей способностью, чем прутковые элеваторы и грохоты, а также более низкой энергоемкостью. Пальцевая форма рабочей поверхности роторов, их упругость и взаимное расположение рядов роторов позволяют снизить контактные повреждения и вероятность защемления клубней, уменьшают залипание роторов и наматывание растительных остатков на валы;

- применение лопастного битера в начале технологического процесса сепаратора почвы позволяет выполнить первичное разрушение структуры картофельного пласта и обеспечивает его устойчивую подачу на поверхность ротационного сепаратора при минимальном повреждении клубней;

- с целью повышения эффективности и надежности сепараторов ротационного типа в сложных почвенно-климатических условиях Нечерноземной зоны РФ необходимо совершенствовать их конструкцию и компоновку, а также режимы работы.

Исходя из проделанного обзора, были сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, представленные во введении.

2. Теоретические исследования по обоснованию технологической схемы и параметров основных рабочих органов ротационного картофелекопателя

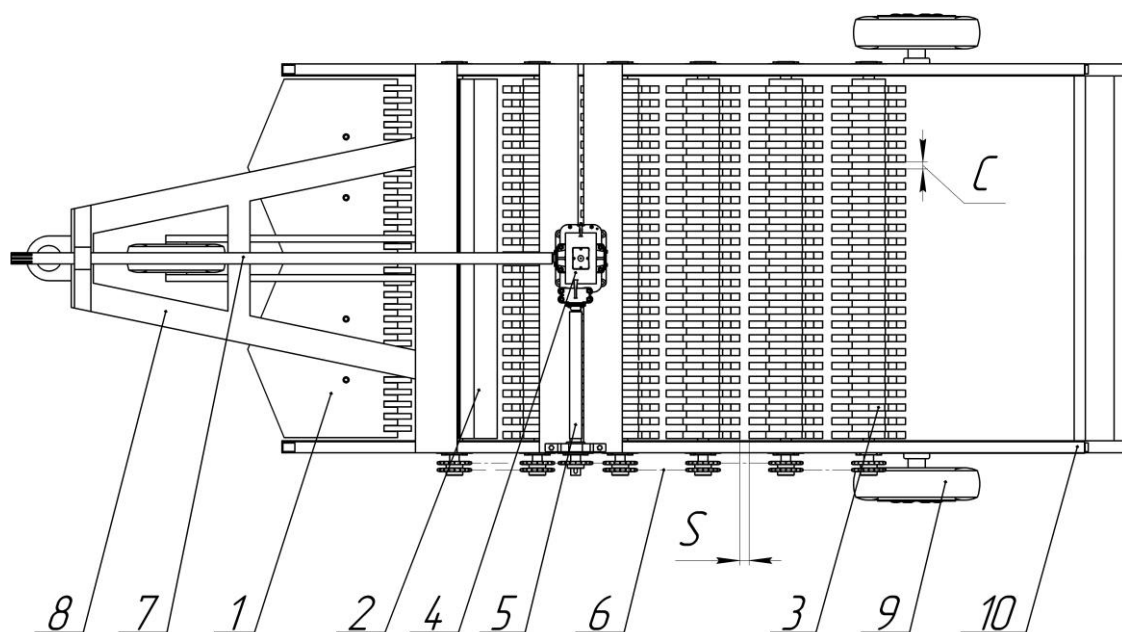
2.1 Обоснование технологической схемы картофелекопателя и основных параметров приемно-подающего битера и роторов сепаратора

Аналитические исследования сепарирующих устройств картофелеуборочных машин (пункт 1.2), а также интенсификаторов, работающих с ними в комплексе (пункт 1.3), показали функциональные преимущества сепараторов ротационного типа относительно других конструкций. Они обладают высокой сепарирующей способностью, надежностью, небольшим удельным весом, низкой энергоемкостью и степенью травмирования убираемой культуры. Поэтому, на основании результатов ранее проведенных изысканий ротационных сепараторов, проведенных В.М. Алакиным, С.С. Осторумовым и С.А. Плаховым [4,71,82], была предложена новая конструкция ротационного сепаратора. В качестве рабочего органа предложили ротор увеличенного (относительно аналогов) диаметра, со скругленными рабочими выступами и большей толщиной основания. Исследованиями В.М. Алакина и С.А. Плахова было установлено, что скругленная поверхность выступов предотвращает защемление комков, клубней и растительных остатков в зоне перехода картофельного пласта с одной ротационной секции на другую.

Анализ технологических схем картофелекопателей с различными типами ротационных сепарирующих поверхностей (пункт 1.2) показал, что между верхними кромками лемехов и первым рядом ротационных рабочих органов образуется значительный перепад высот. В разрабатываемом сепараторе данный перепад будет предположительно больше, чем в рассмотренных ранее конструкциях [23,57,71,85,105], по причине увеличения диаметра роторов. Это может привести к сгуживанию картофельного пласта перед первым рядом роторов.

Поэтому на основании обзора различных типов битеров, применяемых в комплексе с прутковыми элеваторами, предложен вариант компоновки основных рабочих органов картофелекопателей, заключающийся в совмещении лопастного битера (в качестве интенсификатора) и нового ротационного сепаратора.

На этапе обоснования конструктивной схемы была предложена компоновка картофелекопателя, состоящая из лемеха, приемно-подающего битера и ротационного сепаратора (рисунок 22). В данной конструкции приемно-подающий бите́р 2 будет располагаться между первой секцией ротационного сепаратора 3 и подкапывающими лемехами базовой конструкции 1. Вращающиеся секции будут установлены с помощью подшипниковых опор на раме 10. Их вращение будет происходить в направлении обратном движению картофелекопателя, за счет чего исключится вероятность защемления комков и клубней, а также предотвратится наматывание растительности роторами. Привод приемно-подающего битера 2 и рабочих секций ротационного сепаратора 3 будет осуществлен от ВОМ трактора, через карданный вал 7, трехступенчатый угловой редуктор 4, промежуточный вал 5 и цепную передачу 6 (рисунок 22). В конструкции ротационного сепаратора, на основании ранее проведенных исследований С.С. Остроумова [71], предложили использовать от 5 до 6 параллельно расположенных и вращающихся в одном направлении рабочих секций. Каждая секция представляет собой вал с закрепленными на нем ротационными рабочими органами. Между роторами предложили установить сменные распорные втулки. Они обеспечат возможность смещения роторов вдоль валов для создания сепарирующих зазоров, в том числе равных минимально допустимому размеру клубней. Таким образом, их величину можно установить подбором ширины втулок в пределах от 30 до 50 мм.



1 – лемех, 2 – приемно-подающий битер, 3 – ротационный сепаратор, 4 – угловой редуктор, 5 – промежуточный вал, 6 – цепная передача, 7 – карданный вал, 8 – прицепное устройство к трактору, 9 – опорные колеса, 10 – рама

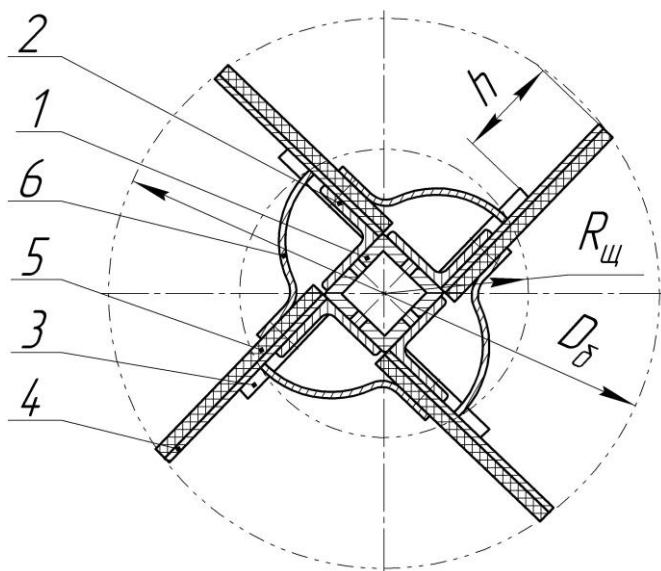
Рисунок 22 – Конструктивная схема картофелекопателя с приемно-подающим битером и ротационным сепаратором

При установке просветов C в пределах от 35 мм до 50 мм будет обеспечиваться повышение производительности сепарации почвы, а при уменьшении до 30 мм будут снижаться потери картофеля по минимальному товарному размеру. Рабочие органы соседних секций предложили устанавливать друг за другом без перекрытия выступов соседних рядов. По данным исследований В.М. Алакина [1,4] такая компоновка обеспечит возможность смещения роторов, исключающую зацепление выступов соседних секций, для изменения величины сепарирующих просветов C (рисунок 22). В тоже время технологический зазор S между соседними секциями позволит повысить сепарирующую способность ротационного сепаратора в зависимости от конкретных почвенно-климатических условий и минимального товарного размера убираемых клубней.

Предполагается, что лопастной битер, помимо предварительного разрушения структуры, должен принимать картофельный пласт от

подкапывающих лемехов и устойчиво подавать его на поверхность первого ряда ротационных рабочих органов. Поэтому в его конструкции, по аналогии с известными битерами [8,25,43], предложили использовать четыре регулируемые лопасти. Приемно-подающий бiter должен обладать более высокой транспортирующей способностью, чем секции ротационного сепаратора. В основании лопастей бitera предлагается использовать регулируемые отражающие щитки. Они закроют основание впадины между лопастями, т.е. динамически мертвую зону, и повысят устойчивость подачи картофельного пласта на первую секцию сепаратора.

Исходя из вышесказанного, была предложена конструкция четырех лопастного бitera, состоящая из профиля квадратного сечения 1, уголков 2 и кронштейнов 3, на которых совместно закрепляются пластины 4, резиноканевые лопасти 5 и отражающие щитки 6. В кронштейнах 3 вырезаны пазы для крепления и радиального смещения пластин 4, лопастей 5 и отражающих щитков 6, что позволяет изменять рабочую высоту лопастей h от 150 мм до 220 мм (рисунок 23).



1 – профиль квадратного сечения, 2 – уголок, 3 - кронштейн,
4 - пластина, 5 - лопасть, 6 - отражающий щиток

Рисунок 23 – Схема четырех лопастного бitera

Согласно агротехническим требованиям предлагаемый ротационный картофелекопатель должен обеспечить выкапывание картофеля из междурядий 70, 75 и 90 см, с шириной гнезд до 45 см и глубиной залегания до 22 см [10]. Причем на поверхность поля необходимо извлечь не менее 95% урожая, провести щадящий сброс и укладывание отсепарированных клубней следом за сепаратором картофелекопателя в полосу шириной до 1 м без повреждений [21,22].

После обоснования конструктивной схемы выполнили определение внешних диаметров лопастного битера и рабочих органов сепарирующего устройства ротационного картофелекопателя (рисунок 24). Для этого воспользовались графоаналитической методикой. Ее первый этап заключался в геометрическом построении схемы и параметров размещения подкапывающих лемехов, битера и роторов с учетом их рабочих размеров (рисунок 24).

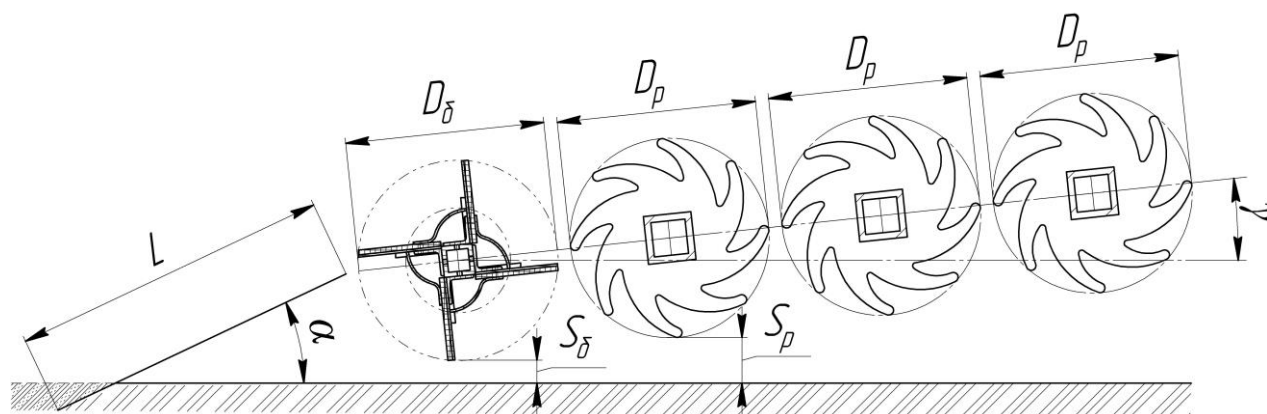


Рисунок 24 – Схема компоновки ротационного картофелекопателя

В конструкции ротационного картофелекопателя использовали пассивные лемеха, параметры которых определили по известной методике [37,69]. К преимуществам пассивных лемехов относят надежность, простоту производства и удобство эксплуатации, а к недостаткам – высокое тяговое сопротивление и сгуживание подкопанного пласта при высокой влажности и засоренности почвы растительностью. Основные параметры пассивного плоского лемеха представлены на рисунке 25.

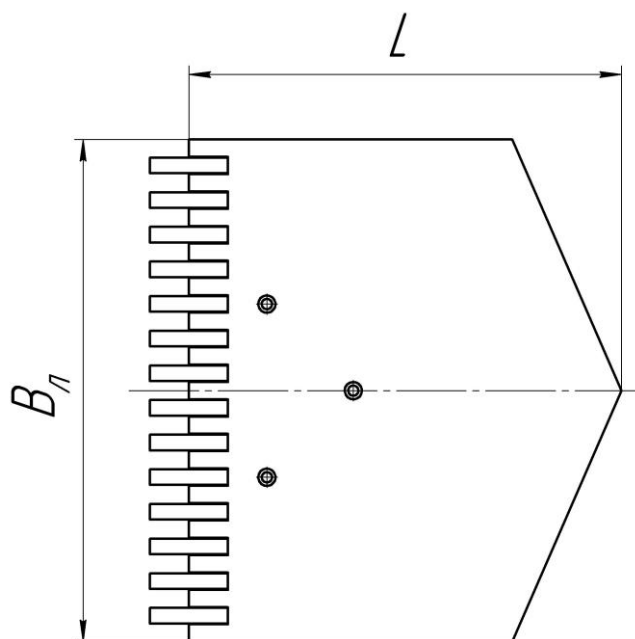


Рисунок 25 – Схема пассивного плоского лемеха

В процессе реализации методики определили следующие основные параметры плоского пассивного лемеха:

α - угол наклона рабочей грани к горизонту, $\alpha=20^\circ$ [70];

L - длина лемеха, мм;

$H_{\text{л}}$ - высота расположения заднего обреза лемеха, мм;

$B_{\text{л}}$ - ширина лемеха, мм.

Первые три параметра связаны геометрической зависимостью [70]:

$$L = \frac{H_{\text{л}}}{\sin \alpha} \quad (1)$$

Опытным путем установлено, что чем больше угол α , тем лучше самоочистка лезвий от ботвы и от налипшей почвы. Однако вместе с тем, из-за сгуживания части пласта перед лемехами, увеличивается и тяговое сопротивление картофелекопателя. В конструкциях лемехов угол наклона α принимают $15...28^\circ$ [16,70]. Для пассивных лемехов максимальное значение высоты $H_{\text{л}}$ не должно превышать 180 мм, в противном случае будет происходить сгуживание картофельного пласта на рабочей поверхности лемехов [16,70]. Для рассматриваемого случая величину $H_{\text{л}}$ выбрали равной 165 мм.

$$L = \frac{165}{0,343} = 480 \text{ мм}$$

Ширину плоского лемеха определили по формуле [70]:

$$B_{\text{л}} = b_3 + 2 \cdot \delta + 2 \cdot (h_n - h_k) \cdot \operatorname{ctg} \varphi_n, \quad (2)$$

где b_3 - ширина залегания клубней в гнезде, $b_3=300$ мм [70];

δ - смещение оси рядка относительно оси лемеха из-за отклонения центра гнезд кустов от средней линии рядка и неточности ведения уборочного агрегата по рядкам, $\delta=40$ мм [70];

h_n - глубина подкапывания, $h_n=200$ мм при уборке окученных рядков [70];

h_k - глубина залегания крайних по ширине гнезда клубней, $h_k=85$ мм [70];

φ_n - угол естественного откоса почвы, $\varphi_n=49^\circ$ [70].

$$B_{\text{л}} = 300 + 2 \cdot 40 + 2 \cdot (200 - 85) \cdot 0,87 = 580 \text{ мм}$$

На втором этапе графоаналитических исследований определили внешний диаметр приемно-подающего битера. Для этого была построена технологическая схема рабочих процессов, включающая совместную компоновку лемехов, лопастного битера и ротационного сепаратора (рисунок 26), с изображением параметров сечения, траектории движения и межоперационного перехода пласта.

Для определения внешнего диаметра битера его сечение разделили на две части. Первая часть является приемной. Она включает в себя правую сторону сечения вместе с горизонтально расположенной лопастью (на этапе подхватывания пласта с лемеха). Вторая часть – рабочая. Она должна поднимать и подавать часть картофельного пласта на вершины первого ряда ротационных рабочих органов (рисунок 26).

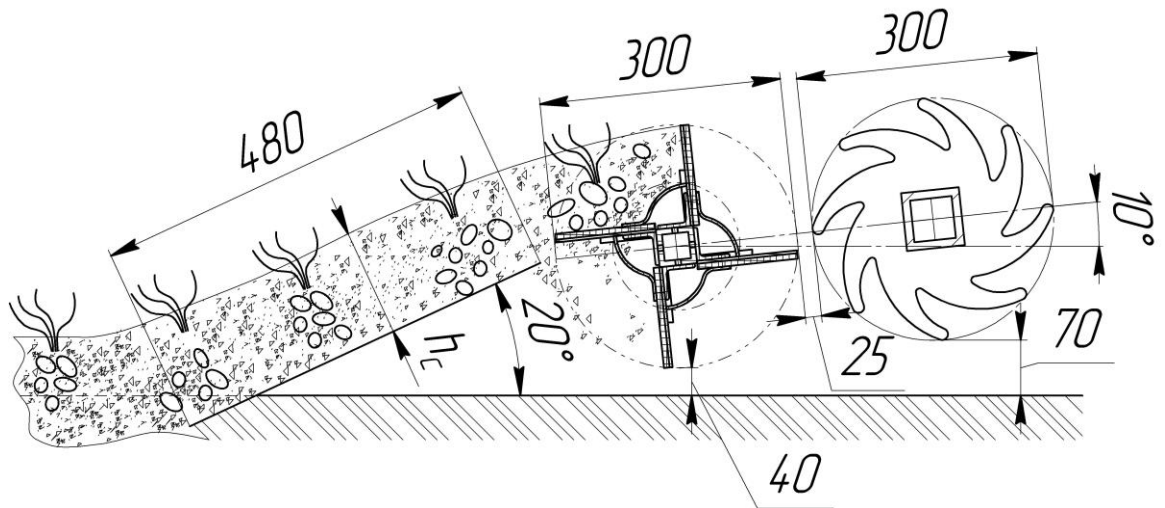


Рисунок 26 – Схема к определению внешних диаметров битера и ротационных рабочих органов

Для обеспечения одного уровня перехода картофельного пласта с лемехов на лопасть битера ось его вращения установили на уровне края лемехов. Для исключения вероятности удара лопастей битера об землю технологический зазор S_6 приняли равным 40 мм. Исходя из технологической схемы (рисунок 26) крайнее верхнее и нижнее положение лопастей битера, относительно его оси, будет соответствовать средней высоте пласта 120 мм и расстоянию 120 мм от технологического зазора. Толщина профиля квадратного сечения составляет 60 мм. Поэтому значение внешнего диаметра битера D_6 в указанных пределах приняли равным 300 мм.

На третьем этапе графоаналитических исследований произвели изыскание внешнего диаметра ротационных рабочих органов D_p . Для этого угол наклона картофелекопателя приняли минимальным (10°), а исходные параметры подкапывающих лемехов и приемно-подающего битера графически изобразили в масштабе, согласно значениям, полученным на первых этапах графоаналитических исследований.

Ранее определили, что для обеспечения устойчивости работы ротационной сепарирующей поверхности лопастью битер должен подавать пласт на вершины роторов первой секции. Из технологической схемы (рисунок 26) видно, что

наилучшие условия для перехода будут при расположении на одном уровне точки отрыва картофельного пласта от лопасти битера и вершин выступов ротационных рабочих органов. В схеме (рисунок 26) учли необходимость увеличения просвета между почвой и нижним уровнем роторов S_p на высоту подъема рамы и насыпного слоя отсепарированной почвы, т.е. до 70 мм. Исходя из этого, для устойчивого перемещения пласта и исключения вероятности зацепления выступов с просеянной почвой, внешний диаметр роторов D_p графически приняли также равным 300 мм.

Общее количество ротационных секций N_c было выбрано на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований ротационного картофелекопателя, проведенных С.С. Остроумовым. Им было установлено, что существенное повышение сепарирующей способности таких рабочих поверхностей происходит при увеличении количества секций с 1 до 5. Установка шестой секции приводила лишь к 5%-му росту просеиваемости почвы, в то время как повреждаемость увеличивалась на 16,6% [71]. Поэтому в разрабатываемом ротационном сепараторе предполагалось использование пяти рабочих секций.

Проведенные изыскания позволили определить конструктивные параметры лемехов, внешние диаметры приемно-подающего битера $D_b=300$ мм и роторов сепаратора картофелекопателя $D_p=300$ мм, а также общее количество секций $N_c=5$ шт. На следующих этапах теоретических исследований провели более детальное определение параметров конструкции рабочей поверхности, а также режимов работы битера и роторов.

Для определения рациональных параметров битера и ротационного сепаратора условно разделим картофелекопатель на три операционные области. В первую (подкапывающе-подающую область) войдут лемеха вместе с битером, во вторую (в зону интенсивной сепарации почвы) первые 3 секции сепаратора, а в третью (в зону окончательной очистки картофельного вороха) оставшиеся 2 секции. Рабочие процессы в данных областях будут существенно отличаться. Для получения более достоверных результатов теоретические обоснования их

конструктивных параметров и режимов работы проведем в соответствии с технологической последовательностью.

2.2 Обоснование основных конструктивных параметров ротационного рабочего органа

После определения внешнего диаметра ротационного рабочего органа были проведены исследования по обоснованию его основных конструктивных параметров. Предложенный в работе новый ротационный рабочий орган, с учетом рекомендаций В.М. Алакина и С.А. Плахова, должен иметь скругленную конструкцию поверхности из высокопрочной резины, с конусообразными выступами, размещенными под углом к вписанной в основание окружности (рисунок 27). Для исследований в качестве основных параметров ротора примем: его внешний диаметр D_p , угол наклона выступов β_e , их высоту H_e , длину L_e , радиус скругления R_e , высоту вершин b_e и общее количество выступов N_e на внешнем диаметре D_p , а также толщину ротора B и параметр посадочного отверстия ζ .

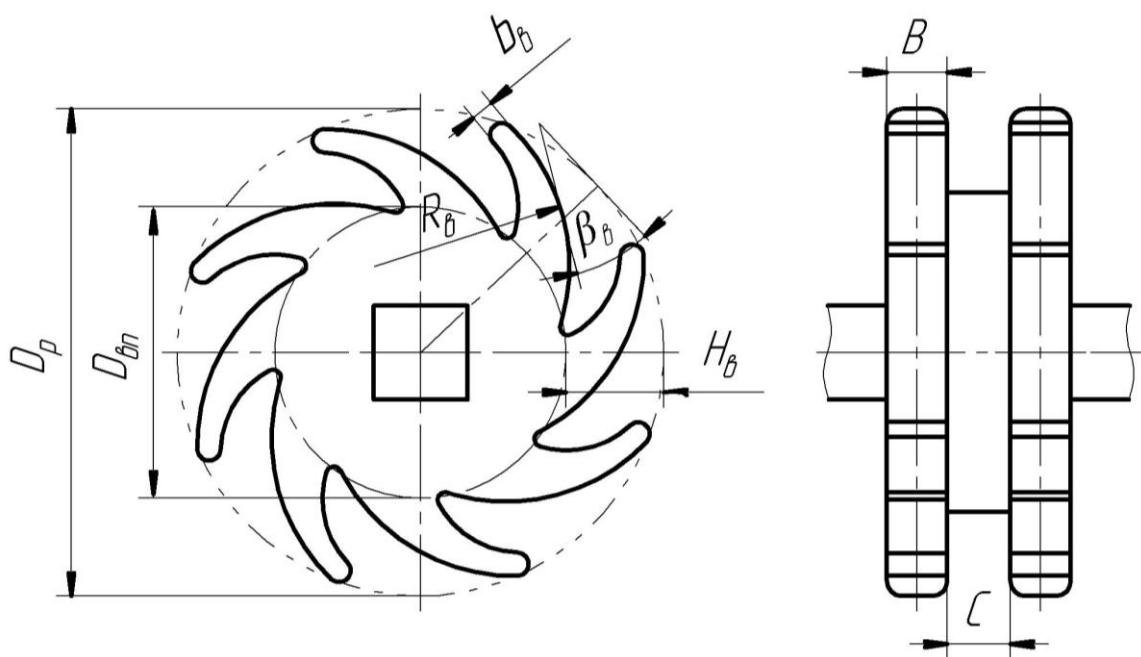


Рисунок 27 – Ротационный рабочий орган

В центре каждого рабочего органа конструктивно расположили посадочное отверстие квадратного сечения для установки на вращающиеся валы. За счет квадратной формы посадочного места исключается вероятность проскальзывания рабочих органов вокруг оси вала. Сепарирующий зазор C между соседними роторами устанавливается посредством распорных втулок. Каждый вал с установленными на нём ротационными рабочими органами и распорными втулками представляет собой отдельную рабочую секцию.

Установка соседних секций друг относительно друга без перекрытия выступов обеспечит возможность смещения роторов вдоль валов для изменения сепарирующего просвета C посредством распорных втулок. Это позволит увеличить сепарирующие просветы и эффективность процесса сепарации, а также обеспечит возможность уборки различного по назначению картофеля. Установка рядов без перекрытия выступов также устраним взаимное защемление роторов соседних секций и контактный износ их поверхностей [64,67]. Однако, в данном случае, между рядами роторов соседних секций образуется впадина. Она может снизить среднюю скорость перемещения компонентов вороха и увеличить ударное воздействие на картофель. Исследования, проведённые В.М. Алакиным, Я.И. Верменко, И.Н. Масленковым, И.И. Поповым, С.С. Остроумовым и другими учеными, показывают, что процесс работы ротационных сепарирующих устройств в основном зависит от угла наклона сепаратора, формы выступов и окружной скорости роторов [23,57,72,85]. Поэтому, по рекомендациям вышеперечисленных ученых, для устойчивого транспортирования картофельного вороха и снижения динамического воздействия на клубни примем угол наклона ротационного сепаратора минимальным (10°), а внешний диаметр рабочих органов D_p , на основании проведенных графоаналитических исследований, равным 300 мм. За счёт небольшого угла наклона снизится количество кинетической энергии, необходимой для выхода клубня из впадины, что в свою очередь приведет к уменьшению числа его соударений с поверхностями роторов. Увеличенный внешний диаметр ротационных рабочих органов D_p должен обеспечить им более высокую окружную скорость, повышение интенсивности

сепарации и устойчивость транспортирования суглинистой почвы повышенной влажности. По рекомендациям [4,82] для уменьшения вероятности защемления клубней приняли скругленную форму выступов и угол их наклона β_e против направления вращения.

Обоснование более детальных параметров конструкции выступов выполнили в два этапа. На первом этапе провели анализ позиционно-силовой схемы и на основе уравнений равновесия определили наиболее эффективные: угол наклона β_e , высоту H_e , длину L_e и радиус скругления R_e выступов. На втором этапе вычислили высоту вершин выступов b_e и их общее количество N_e на принятом диаметре.

Для выполнения первого этапа исследований построили схему сил, возникающих при взаимодействии части картофельного пласта с поверхностью выступа ротора второй секции (рисунок 28).

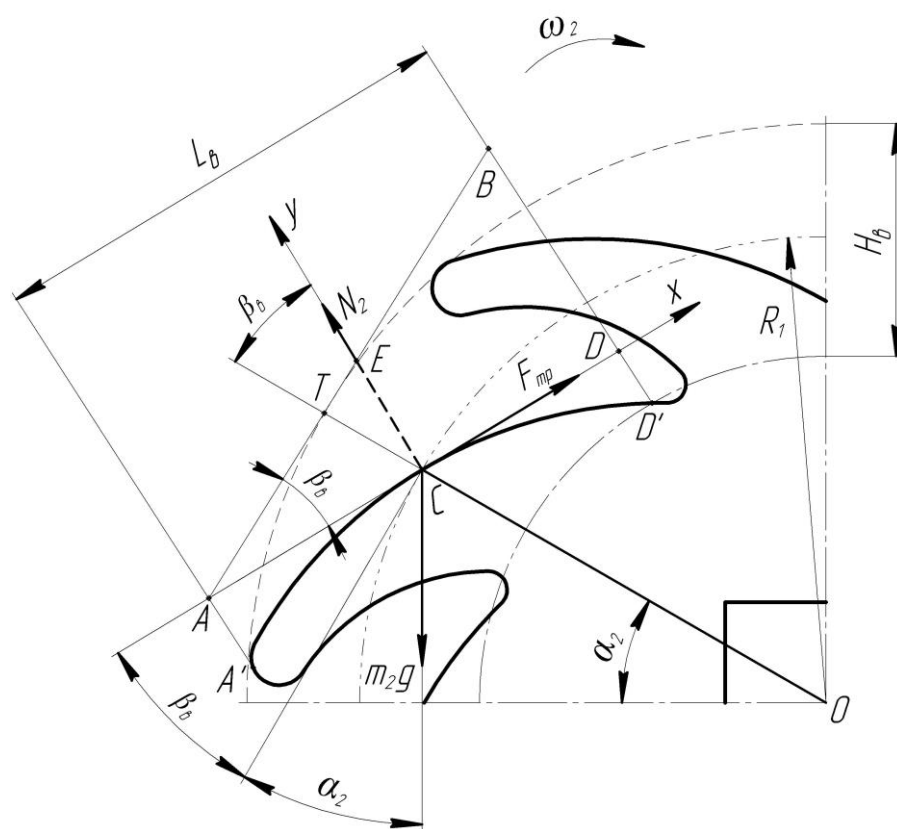


Рисунок 28 – Силы, действующие на часть картофельного пласта, находящегося на выступе ротора

На данном участке сепаратора присутствует большое количество непросеянной почвы, из-за чего увеличивается вероятность сгуживания транспортируемого картофельного пласта. Поэтому выступы роторов второй и третьей секций должны захватывать и устойчиво перемещать его компоненты при угле схода $\alpha_1=36...42^\circ$ и угле подхвата ротационными рабочими органами последующей секции $\alpha_2(0)=40...44^\circ$. Приняв (в главе 2.1) значение внешнего диаметра рабочих органов $D_p=300$ мм найдем угол наклона их выступов β_e (рисунок 28).

Система уравнений равновесия для данного случая имеет вид:

$$\begin{cases} F_{mp} - m_2 g \cos(\alpha_2 + \beta_e) = 0 \\ N_2 - m_2 g \sin(\alpha_2 + \beta_e) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

где N_2 - нормальная сила реакции выступа ротора второй секции, H .

Исходя из условия равновесия, уравнения системы (3) будут иметь вид:

$$\begin{cases} F_{mp} = m_2 g (\cos \alpha_2 \cos \beta_e - \sin \alpha_2 \sin \beta_e) \\ N_2 = m_2 g (\sin \alpha_2 \cos \beta_e + \cos \alpha_2 \sin \beta_e) \end{cases} \quad (4)$$

Заменяя силу трения F_{mp} на $f_p N_2$ получим равенство:

$$\sin \beta_e (f_p \cos \alpha_2 + \sin \alpha_2) = \cos \beta_e (\cos \alpha_2 - f_p \sin \alpha_2), \quad (5)$$

где f_p – коэффициент трения скольжения клубней по резине, $f_p=0,7$.

Затем выразим из (5) $\tan \beta_e$:

$$\tan \beta_e = \frac{\cos \alpha_2 - f_p \sin \alpha_2}{f_p \cos \alpha_2 + \sin \alpha_2} \quad (6)$$

Из уравнения (6) находим, что наиболее подходящее значение угла наклона выступов β_e ротационных рабочих органов составляет $28,5^\circ$.

Высоту выступов H_e ротационных рабочих органов рассчитали по методике предложенной В.М. Алакиным [4]. На основании определенной им зависимости высоты выступов H_e от их угла наклона β_e и внешнего диаметра роторов D_p вычислили, что при $\beta_e=28,5^\circ$ и $D_p=300$ мм расчетное значение высоты

выступов $H_6=62$ мм. Исходя из этого нашли диаметр основания впадин выступов $D_{6n}=176$ мм.

Зная высоту H_6 и угол наклона β_6 выступов можно найти их длину L_6 . Для этого определим длину средней линии CE треугольника ABD (рисунок 28):

$$CE = \frac{H_6}{2 \cos \beta_6} \quad (7)$$

Исходя из этого, длина основания DB :

$$DB = \frac{H_6}{\cos \beta_6} \quad (8)$$

Тогда гипотенуза AB будет равняться:

$$AB = \frac{H_6}{\cos \beta_6 \sin \beta_6} \quad (9)$$

Длина выступов L_6 ротационного рабочего органа:

$$L_6 = \frac{H_6}{\sin \beta_6} \quad (10)$$

Подставляя в уравнение (10) $H_6=62$ мм и $\beta_6=28,5^\circ$ получаем, что рациональное значение длины выступов L_6 ротационного рабочего органа составляет 130 мм.

На основании полученных конструктивных параметров ротора с помощью геометрических построений определим радиус скругления выступов R_6 . Для этого из точек A и D треугольника ABD опустим перпендикуляры AA' и DD' до пересечения соответственно с внешним диаметром ротора D_p и диаметром впадин D_{6n} (рисунок 28). Через получившиеся точки $A'CD'$ можно провести окружность с радиусом 120 мм. Исходя из этого наиболее рациональное значение радиуса скругления выступов $R_6=120$ мм.

Для определения высоты вершин выступов b_6 составим дифференциальное уравнение для изогнутой оси балки:

$$E_p I_6 S''_6 = M_y, \quad (11)$$

где E_p - модуль упругости материала ротора, МПа;

I_6 - момент инерции сечения выступа ротора, $м^4$;

S_ϵ - величина прогиба выступа ротора, м;

M_y - изгибающий момент, Нм.

Момент инерции сечения выступа будет равен:

$$I_\epsilon = \frac{b_\epsilon B^3}{12}, \quad (12)$$

где B - ширина выступа ротора, м.

Изгибающий момент в сечение выступа:

$$M_y = -F_y x_\epsilon \quad (13)$$

Подставим (13) в уравнение (11):

$$E_p I_\epsilon S_\epsilon'' = -F_y x_\epsilon \quad (14)$$

Проинтегрируем полученное выражение:

$$E_p I_\epsilon \gamma_\epsilon' = -\frac{F_y x_\epsilon^2}{2} + C_1 \quad (15)$$

Проинтегрируем второй раз:

$$E_p I_\epsilon S_\epsilon = -\frac{F_y x_\epsilon^3}{6} + C_1 x_\epsilon + C_2 \quad (16)$$

Коэффициенты C_1 и C_2 найдем из следующих условий:

а) при $x_\epsilon = L_\epsilon$, $S_\epsilon = 0$;

б) при $x_\epsilon = L_\epsilon$, $\gamma_\epsilon = S_\epsilon' = 0$.

Из первого и второго условий получили:

$$C_1 = \frac{F_y x_\epsilon^2}{2} \quad (17)$$

$$C_2 = -\frac{F_y L_\epsilon^3}{3} \quad (18)$$

Очевидно, что $S_{\epsilon \max}$ и $\gamma_{\epsilon \max}$ будут только в том случае, когда $x_\epsilon = 0$. Исходя из этого:

$$S_\epsilon' = \gamma_\epsilon = \frac{F_y L_\epsilon^2}{2 E_p I_\epsilon} \quad (19)$$

$$S_{\epsilon} = -\frac{F_y L_{\epsilon}^3}{3E_p I_{\epsilon}} \quad (20)$$

Применяя к выражению (20) третий закон Ньютона нашли N_{cp} :

$$N_{cp} = \frac{3E_p I_{\epsilon} S_{\epsilon}}{L_{\epsilon}^3} \quad (21)$$

Согласно ранее проведенным исследованиям [4,72,82] рациональная толщина роторов B находится в пределах от 20 мм до 30 мм, а максимальная деформация выступа S_{ϵ} при нагрузках N_{cp} до 1300 Н/м² не должна превышать 2...3 мм. Для расчетов предварительно приняли средние значения толщины роторов $B=25$ мм и деформации выступа $S_{\epsilon}=2,5$ мм. Исходя из этого, по формулам (12) и (21) определили, что рациональная высота вершин выступов b_{ϵ} должна равняться 15 мм. На основании полученных конструктивных параметров выступов ротора было определено, что на внешнем диаметре ротора $D_p=300$ мм можно разместить определенное число выступов N_{ϵ} . Посредством геометрических построений выявили их рациональное количество $N_{\epsilon}=8$ шт. (рисунок 27).

В результате проведенных теоретических исследований были определены основные конструктивные параметры ротационных рабочих органов: угол наклона выступов $\beta_{\epsilon}=28,5^{\circ}$, их высота $H_{\epsilon}=62$ мм, длина $L_{\epsilon}=130$ мм, радиус скругления $R_{\epsilon}=120$ мм и высота вершин $b_{\epsilon}=15$ мм, а также общее количество выступов на одном роторе $N_{\epsilon}=8$ шт.

Для определения рациональной толщины роторов B и для обеспечения высокой эффективности сепарации почвы необходимо провести исследования упругой устойчивости выступов роторов при их взаимодействии с картофельным пластом.

2.3 Определение деформаций выступов роторов, возникающих под действием рабочих нагрузок

Теоретические исследования, проведённые В.М. Алакиным, С.С. Остроумовым и другими учеными [4,72,82], показали, что зависимость прогиба выступа ротационного рабочего органа от воспринимаемой им нагрузки оказывает большое влияние на долговечность роторов, на повреждаемость урожая и на характер перемещения компонентов картофельного вороха по сепарирующей поверхности. Чрезмерный прогиб выступов рабочих органов может привести к росту скорости их износа, а также к снижению транспортирующей и сепарирующей способности ротационных секций. Вышесказанное наиболее актуально для исследования зоны интенсивной сепарации, где вместе с картофелем присутствует большое количество не разрушенных и не просеянных почвенных примесей. Силы от действия почвы на выступы роторов на данном участке ротационной сепарирующей поверхности будут иметь значения пропорциональные объему подкапываемого пласта. Исходя из этого необходимо рассчитать рациональное значение толщины роторов B при котором прогиб выступов S_g будет находиться в допустимых пределах, т.е. от 2 до 3 мм.

На первом этапе рассчитали давление части картофельного пласта на отдельный выступ. Силу тяжести картофельного пласта вычислили из формулы:

$$F = \rho L_g B h_c g, \quad (22)$$

где ρ – плотность пласта, $кг/м^3$;

h_c – высота перемещаемого пласта, м.

Тогда давление на поверхность выступа определим по формуле:

$$q = \frac{F}{L_g B} \quad (23)$$

Подставляя (22) в (23) получим:

$$q = \rho h_c g \quad (24)$$

Согласно данным [81] средняя плотность пласта ρ составляет 1100 кг/м^3 , а его высота $h_c=0,12 \text{ м}$. Подставляя эти значения в (24) получаем $q=1300 \text{ Н/м}^2$.

Получившееся значение справедливо для статической нагрузки. В данном же случае происходит динамическое нагружение выступа ротора. Поэтому необходимо ввести повышающий динамический коэффициент $k_d=1,3$. Тогда давление q' на эту поверхность составит 1700 Н/м^2 .

На втором этапе определили величину прогиба выступа рабочего органа S_e от действующих нагрузок. Расчет произвели с помощью программы Solidworks Simulation Express [9]. Подставив полученные значения нагружения в расчетную модель и установив закрепление по посадочному отверстию определили распределение напряжений в роторе (рисунок 29).

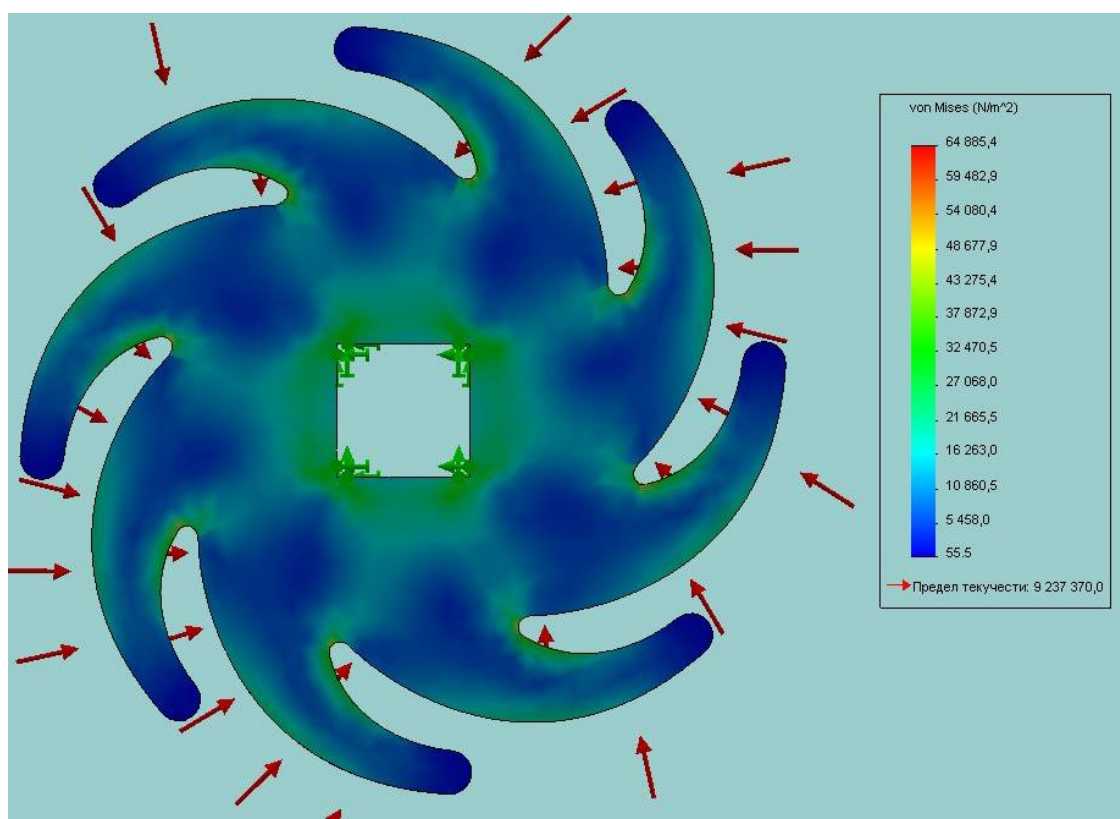


Рисунок 29 - Распределение напряжений в нагруженном роторе

Затем в данной программе, также, произвели расчет прогиба выступа рабочего органа S_e от воспринимаемой нагрузки q' [9]. Подставив полученные

значения динамической нагрузки в расчетную модель и установив закрепление по посадочному отверстию получили картину распределения деформаций в нагруженном роторе (рисунок 30).

Максимальную величину прогиба S_e определили с помощью анализа деформированного состояния рабочего органа (рисунок 30). Максимальное перемещение, возникающее в ротационном рабочем органе, находится на краю выступа.

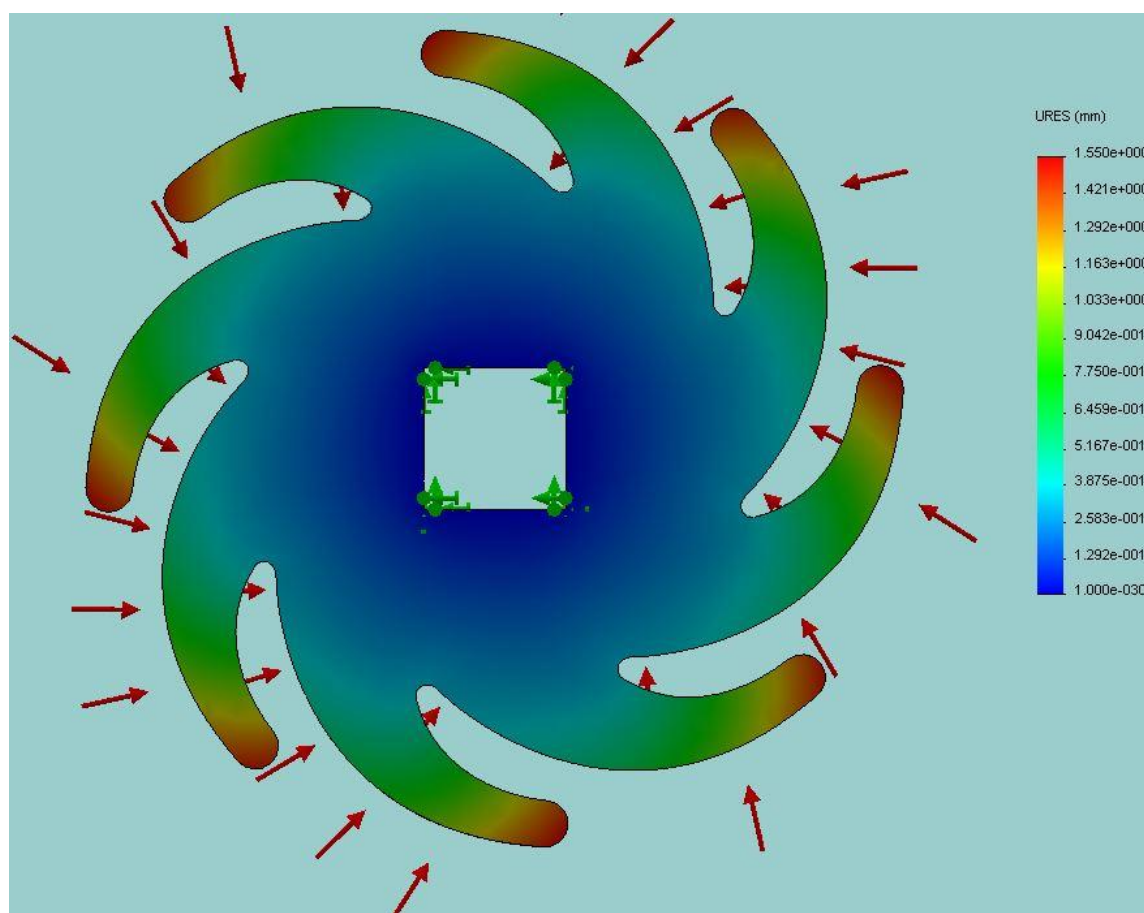


Рисунок 30 - Распределение деформаций в ротационном рабочем органе

Анализ зависимости прогиба выступа ротационного рабочего органа S_e от величины воспринимаемой им нагрузки q' (рисунок 30) показал, что величина деформации выступа ротационного рабочего органа уменьшается от его края к основанию. Подставляя поочередно в расчетную модель значения толщины ротора B - 20, 25 и 30 мм определили, что соответствующие им величины прогиба

выступов S_e равняются 1,9 мм, 1,6 мм и 1,4 мм. Исходя из вышесказанного сделали вывод, что для обеспечения наименьших значений материалоемкости и прогиба выступов S_e толщина роторов B должна равняться 25 мм.

В результате проведенных исследований было установлено, что в условиях динамического нагружения наибольшее перемещение, возникающее в ротационном рабочем органе, происходит на краю выступа. Рациональная толщина роторов B и максимальная величина прогиба S_e были определены посредством теоретических расчетов и с помощью анализа деформированного состояния рабочего органа. Данные величины составили 25 мм и 1,6 мм соответственно. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что максимальная величина прогибов выступов S_e , даже в самых неблагоприятных условиях, не должна существенно влиять на работоспособность ротора. В ходе экспериментальных полевых опытов планируется исследовать состояние упругости поверхности роторов, при их взаимодействии с картофельным пластом, исходя из оценки устойчивости его перемещения без сгруживания.

2.4 Определение режимов работы четырех лопастного битера

Аналитический обзор различных типов битеров показал, что при определении их основных конструктивных и кинематических параметров необходимо учитывать скорость схода подкопанного пласта с лемехов и транспортирующий режим работы сепарирующего устройства. К параметрам рабочих органов ротационной сепарирующей поверхности, влияющим на процесс приема картофельного пласта от четырех лопастного битера, можно отнести: внешний диаметр D_p , частоту вращения n_1 , форму и размеры выступов, а также расположение роторов относительно битера.

Основными задачами исследуемого битера являются прием, предварительное разрушение структуры картофельного пласта и его устойчивая подача на вершины первого ряда роторов. Поэтому в качестве первого условия эффективной работы битера примем режим устойчивого приема и подачи части

картофельного пласта без сгруживания. Второе условие заключается в обеспечении подъема пласта на вершины роторов первой секции сепарирующей поверхности без перебрасывания на вторую.

В.М. Алесенко разделял процесс работы лопастного битера на следующие этапы [8]:

- 1) внедрение лопасти в почву и захват части массы грядки;
- 2) движение массы вдоль лопасти;
- 3) отделение массы от лопасти и ее движение под действием приложенных сил.

В результате анализа рабочих процессов битеров выяснили, что на первые два этапа наибольшее влияние будут оказывать: внешний диаметр битера D_b , радиус отражательных щитков $R_{щ}$ и угловая скорость битера ω_b . Внешний диаметр четырех лопастного битера D_b приняли на основании результатов исследований, проведенных в разделе 2.1. Для устойчивого приема, перемещения и подачи пласта на роторы лопастной битер должен обладать более высокой, по сравнению со скоростью схода картофельного пласта с лемехов, транспортирующей способностью. Поэтому, для исключения перегрузки битера на первых двух этапах его работы, необходимо определить его минимальную угловую скорость ω_{min} .

Для этого сперва рассчитали время заполнения лопасти почвой $t_{зан}$:

$$t_{зан} = \frac{R_l - R_{щ}}{V_r}, \quad (25)$$

где V_r - скорость движения пласта по лемеху, м/с;

$R_l, R_{щ}$ - соответственно радиусы лопасти и щитка битера, м.

В.П. Горячкин, И.М. Панов, В.И. Ветохин в своих работах указывают на то, что скорость движения картофельного пласта по лемеху V_r определяется видом деформации, состоянием почвы и углом наклона лемеха α [31]. В момент уплотнения пласта его частицы перемещаются перпендикулярно передней грани лемеха под углом $\psi_6 = \frac{\pi}{2} - \gamma_l$.

Поэтому скорость движения подкопанного пласта по поверхности лемеха V_r определили по формуле [31]:

$$V_r = V_k \frac{\sin \psi_\theta}{\sin(\alpha + \psi_\theta)}, \quad (26)$$

где V_k - скорость движения картофелекопателя, м/с;

α - угол наклона лемеха, градус.

Заполнение бitera происходит при повороте лопасти α_l на 45° (рисунок 33) и скорости движения картофелекопателя $V_k=1,1 \dots 1,7$ м/с. Подставляя эти значения в уравнения (25), (26) определили, что время заполнения лопасти бitera почвой $t_{зан}$ составляет от 0,1 до 0,07 с (рисунок 31).

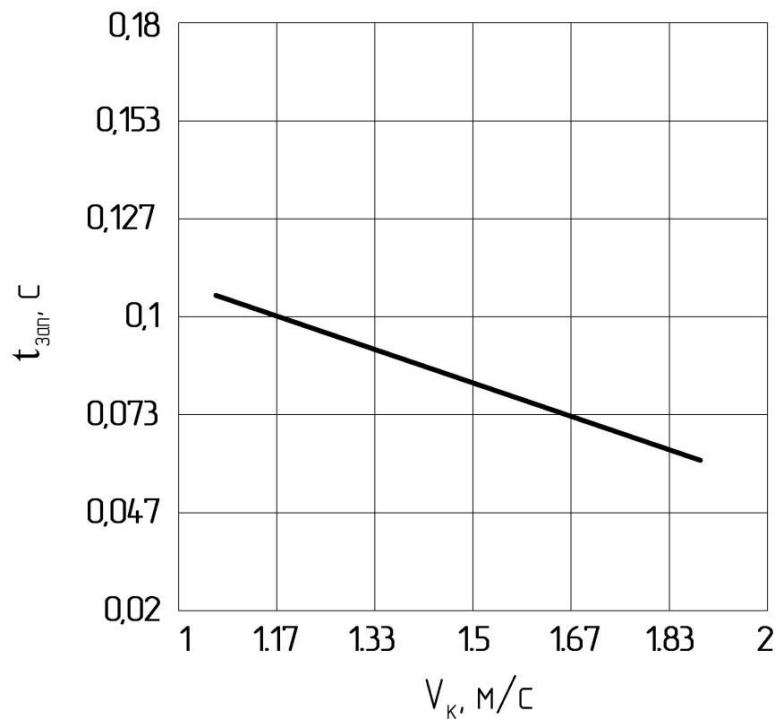


Рисунок 31 - Зависимость времени заполнения бitera $t_{зан}$ от скорости движения картофелекопателя V_k

Получив значения времени заполнения бitera $t_{зан}$ определили минимальную угловую скорость бitera $\omega_{min} = \alpha_l \cdot t_{зан}$. Для устойчивого приема пласта она должна находиться в пределах от 8,1 до 12,1 с^{-1} . На основании

полученных результатов построили график зависимости минимальной угловой скорости бitera ω_{min} от скорости движения картофелекопателя V_k (рисунок 32).

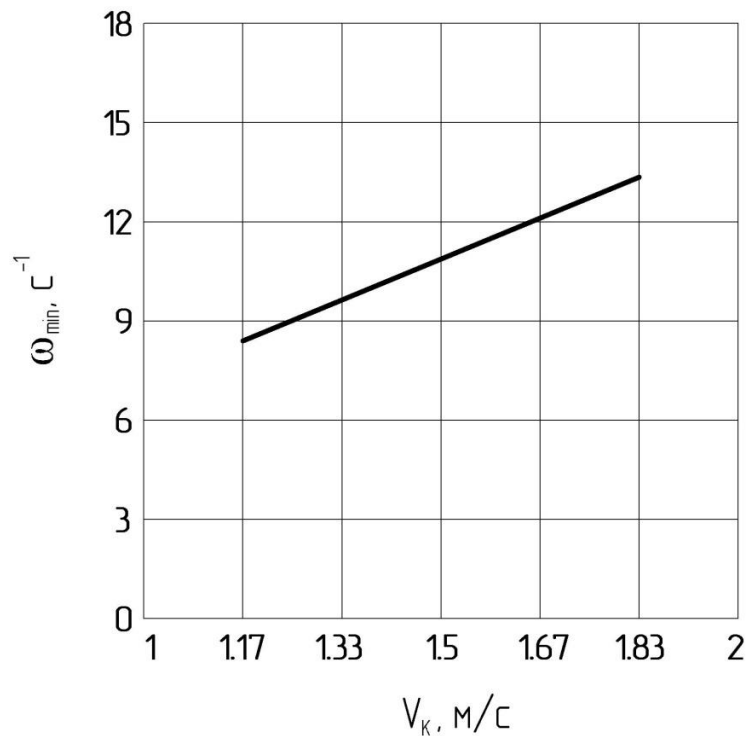


Рисунок 32 - Зависимость минимальной угловой скорости бitera ω_{min} от скорости движения картофелекопателя V_k

Третий этап работы бitera определяется скоростью схода V_c и углом отрыва β_c картофельного пласта от лопасти, которые в свою очередь зависят от угловой скорости бitera ω_b , радиуса $R_{ш}$ и расположения отражательных щитков. Поэтому сначала определили предварительные значения скорости схода V_0 и угла отрыва α_0 части картофельного пласта от лопасти бitera, необходимые для его устойчивого подъема на вершины рабочих органов первой секции сепарирующей поверхности. Для анализа данного процесса построили схему отделения части картофельного пласта от лопасти бitera с траекторией ее движения под действием приложенных сил (рисунок 33). Исходя из параметров принятой компоновки ротационного картофелекопателя, наивысшая точка H будет равняться $0,15...0,2 \text{ м}$, а расстояние от точки отрыва до вершины роторов $S_x=0,35...0,41 \text{ м}$.

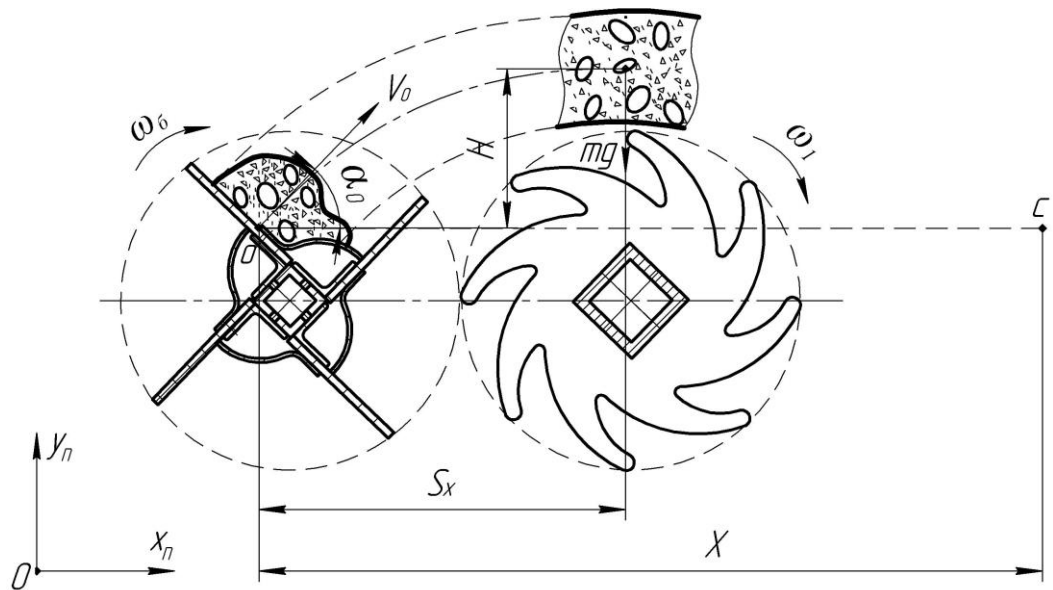


Рисунок 33 – Схема отделения части картофельного пласта от лопасти битера и траектория ее движения

После схода с лопасти на часть картофельного пласта действует только сила тяжести (рисунок 33). Ее проекции на оси x_n и y_n имеют вид:

$$\begin{cases} \Sigma P_{ix_n} = 0, \\ \Sigma P_{iy_n} = -mg, \end{cases} \quad (27)$$

где m - масса части пласта, кг;

g - ускорение свободного падения, м/с^2 .

Из системы (27) следует, что для определения предварительных значений скорости схода V_0 и угла отрыва α_0 картофельного пласта от лопасти битера можно воспользоваться общепринятыми формулами, описывающими динамику движения тела брошенного под углом к горизонту (без учета сопротивления воздуха) [11,100].

Горизонтальная дальность полета части картофельного пласта [100]:

$$X = \frac{V_0^2}{g} \sin 2\alpha_0 \quad (28)$$

Наивысшая точка полета части картофельного пласта [100]:

$$H = \frac{V_0^2}{2g} \sin^2 \alpha_0 \quad (29)$$

Общее уравнение движения части картофельного пласта имеет вид [100]:

$$y_n = x_n \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 - \frac{g x_n^2}{2 V_0^2 \cos^2 \alpha_0} \quad (30)$$

Вследствие того, что сход и подача пласта с бitera происходят за некоторый промежуток времени t_6 предпочтительнее применять настильную траекторию перемещения материала. Подставляя в формулы (28), (29), (30) значения горизонтальной дальности $S_x=0,35$ м и наивысшей точки полета $H=0,2$ м определили, что при среднем угле начала отрыва $\alpha_0=70^\circ$ скорость схода клубненосного пласта V_0 должна равняться 1,9 м/с.

Однако в процессе работы картофелекопателя бiter совершает сложное движение (состоящее из вращательного и поступательного). Поэтому реальные значения скорости схода V_c и угла отрыва β_c части пласта определили из треугольника скоростей (рисунок 34).

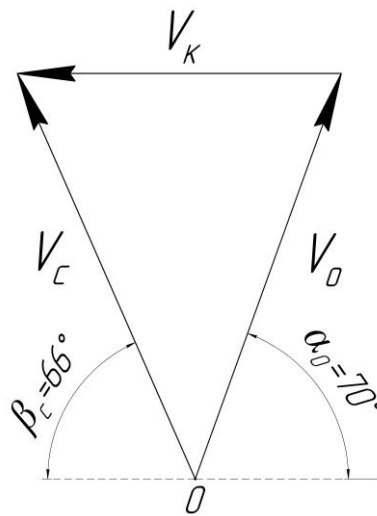


Рисунок 34 – Треугольник скоростей движения части картофельного пласта

Исходя из треугольника скоростей, для устойчивой подачи клубненосного пласта на первую секцию сепарирующей поверхности, необходимо определить частоту вращения ω_6 и размеры отражательных щитков $R_{щ}$ при которых угол отрыва β_c будет равен $80...60^\circ$, а скорость схода $V_c=1,7...2$ м/с. Зависимости

скорости картофелекопателя V_k и скорости схода части картофельного пласта V_c от угла отрыва β_c приведены на рисунках 35 и 36.

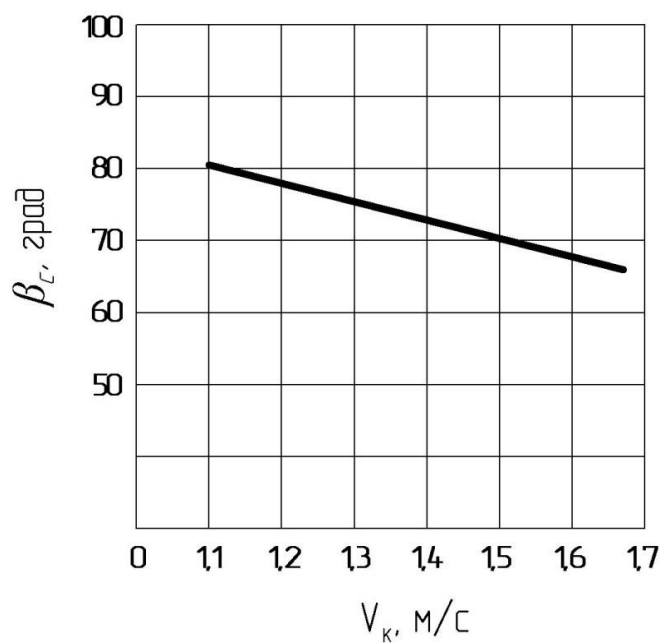


Рисунок 35 - Зависимость угла отрыва части картофельного пласта β_c от скорости движения картофелекопателя V_k

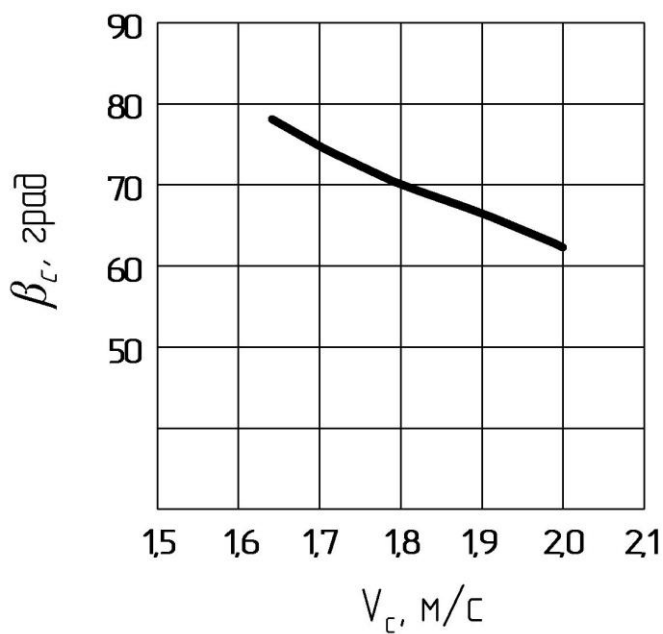


Рисунок 36 - Зависимость угла отрыва β_c от скорости схода V_c части картофельного пласта с лопасти битера

Для определения рациональной угловой скорости бitera ω_b составили дифференциальное уравнение, описывающее движение картофельного пласта по поверхности лопасти (рисунок 37).

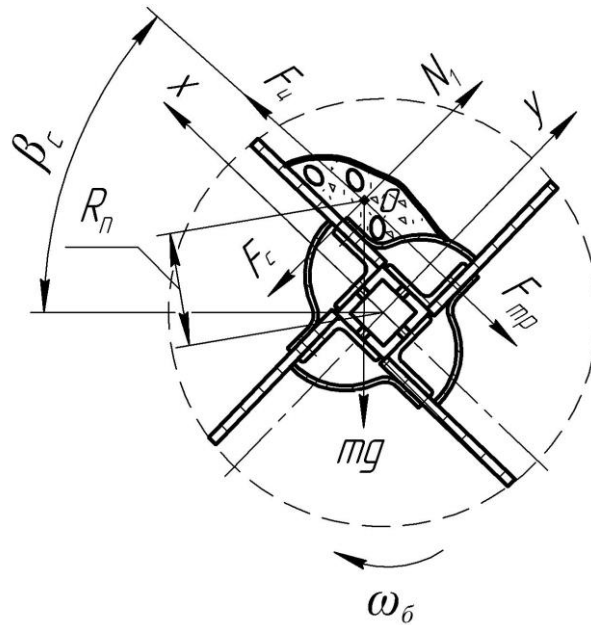


Рисунок 37 – Схема сил действующих на часть картофельного пласта, перемещаемого битером

Для этого все силы, действующие на материал, спроецировали на ось x . Центр системы координат совместили с центром бitera и направили оси x , y параллельно его лопастям (рисунок 37). По модулю сила реакции поверхности лопасти N_1 всегда будет равна сумме проекций на ось y силы тяжести пласта mg и силы Кориолиса F_c . Исходя из этого, можно сделать вывод, что движение массы (относительно лопасти бitera) будет происходить только по оси x .

$$m\ddot{x} = F_u - F_{mp} - mg \sin \beta_c, \quad (31)$$

где m - масса части картофельного пласта, кг;

$\ddot{x}$ - ускорение части картофельного пласта по оси x , м/с^2 ;

F_u - центробежная сила инерции, Н;

F_{mp} - сила трения скольжения, Н;

R_n - расстояние от центра бitera до центра перемещаемого слоя, м.

Таким образом получили инерционную систему координат. При ее использовании необходимо учитывать возникающие центробежные F_u и Кориолисовы F_c силы инерции. Значение R_n выразили через переменную x .

Сила реакции поверхности лопасти N_1 :

$$N_1 = 2m\omega_\delta \dot{x} + mg \cos \beta_c \quad (32)$$

Исходя из (32) сила трения F_{mp} будет иметь вид:

$$F_{mp} = fN_1 = f(2m\omega_\delta \dot{x} + mg \cos \beta_c), \quad (33)$$

где f - коэффициент трения скольжения почвы по резине, $f=0,7$.

Центробежную силу F_u , силу Кориолиса F_c , силу трения F_{mp} , а также силу реакции поверхности лопасти N_1 подставили в уравнение (31):

$$\ddot{x} + 2f\omega_\delta \dot{x} - \omega_\delta^2 x = -fg \cos \omega_\delta t_\delta - g \sin \omega_\delta t_\delta, \quad (34)$$

где t_δ - переменная времени, с.

Решение получившегося линейного неоднородного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами представляет собой сумму общего решения соответствующего однородного уравнения X_1 и частного решения неоднородного уравнения $\tilde{x}$.

Для (34) нашли общее решение соответствующего однородного уравнения:

$$\ddot{x} + 2f\omega_\delta \dot{x} - \omega_\delta^2 x = 0 \quad (35)$$

Составили для (35) характеристическое уравнение:

$$\lambda^2 + 2f\omega_\delta \lambda - \omega_\delta^2 = 0 \quad (36)$$

Решая квадратное уравнение (36), получили два различных действительных корня. Исходя из этого общее решение (34) будет иметь вид:

$$X_1 = C_1 e^{B_1 t_\delta} + C_2 e^{B_2 t_\delta}, \quad (37)$$

где C_1 и C_2 - постоянные интегрирования;

B_1 и B_2 - корни характеристического уравнения.

$$B_1 = 0,5\omega_\delta; \quad B_2 = -2\omega_\delta$$

Получив корни B_1 и B_2 нашли частное решение линейного неоднородного дифференциального уравнения (34). Вследствие того, что решением однородного

уравнения (35) являются два различных действительных корня, неоднородное уравнение будет иметь вид:

$$\tilde{x} = A \cos \omega_{\delta} t_{\delta} + B \sin \omega_{\delta} t_{\delta}, \quad (38)$$

где A, B - постоянные коэффициенты.

Находим первую и вторую производные $\tilde{x}$:

$$\tilde{x}' = -\omega_{\delta} A \sin \omega_{\delta} t_{\delta} + \omega_{\delta} B \cos \omega_{\delta} t_{\delta} \quad (39)$$

$$\tilde{x}'' = -\omega_{\delta}^2 A \cos \omega_{\delta} t_{\delta} - \omega_{\delta}^2 B \sin \omega_{\delta} t_{\delta} \quad (40)$$

Подставляя (38), (39), (40) в уравнение (34) определяем постоянные коэффициенты A, B :

$$A = \frac{fg}{\omega_{\delta}^2(1+f^2)} \quad (41)$$

$$B = \frac{g(1-f^2)}{2\omega_{\delta}^2(1+f^2)} \quad (42)$$

Составим общее решение линейного неоднородного дифференциального уравнения (34):

$$x = X_1 + \tilde{x} = C_1 e^{B_1 t_{\delta}} + C_2 e^{B_2 t_{\delta}} + A \cos \omega_{\delta} t_{\delta} + B \sin \omega_{\delta} t_{\delta} \quad (43)$$

Первая производная получившегося уравнения (43) будет иметь вид:

$$\dot{x} = C_1 B_1 e^{B_1 t_{\delta}} + C_2 B_2 e^{B_2 t_{\delta}} - A \omega_{\delta} \sin \omega_{\delta} t_{\delta} + B \omega_{\delta} \cos \omega_{\delta} t_{\delta} \quad (44)$$

Подставляя в (43), (44) начальные условия $t_{\delta}(0)=0$; $x(0)=R_{\text{ш}}$; $\dot{x}(0)=0$ найдем постоянные интегрирования C_1 и C_2 :

$$C_1 = \frac{B_2(A - R_{\text{ш}}) + B\omega_{\delta}}{B_1 - B_2} \quad (45)$$

$$C_2 = \frac{B_1(R_{\text{ш}} - A) + B\omega_{\delta}}{B_1 - B_2} \quad (46)$$

Полученное уравнение (43) определяет положение картофельного пласта на лопасти битера в зависимости от установленной угловой скорости ω_{δ} и времени t_{δ} . Зависимость скорости перемещения картофельного пласта $\dot{x}$ по

поверхности лопасти бitera от времени t_{δ} и угловой скорости ω_{δ} определяется выражением (44).

Из уравнения (43) видно, что разгрузка бitera будет происходить в течение промежутка времени t_{δ} . В качестве угла начала разгрузки приняли минимальный расчётный угол β_c , для того, чтобы подъем картофельного пласта происходил по настильной траектории. Уравнение (44) показывает, что минимальная скорость схода V_c картофельного пласта с лопасти бitera будет в наивысшей точке отрыва (при $\beta_c=90^\circ$). Однако с дальнейшим увеличением угла β_c повысится и скорость схода V_c , компенсируя тем самым уменьшение высоты точки отрыва картофельного пласта от поверхности лопасти.

Принимая во внимание полученные аналитические закономерности работы бitera, рассчитали рациональные значения угловой скорости бitera ω_{δ} в зависимости от скорости работы картофелекопателя V_k (таблица 3).

Таблица 3 – Расчетные значения угловой скорости бitera ω_{δ} в зависимости от скорости работы картофелекопателя V_k

$V_k, \text{ м/с}$	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
$\omega_{\delta}, \text{ с}^{-1}$	29	31	32	33,5	34,5	35,5

На основании полученных уравнений (43) и (44) определили, что при диаметре четырех лопастного бitera $D_{\delta}=0,3 \text{ м}$ наиболее рациональный радиус отражательных щитков $R_{щ}$ составляет $0,08 \text{ м}$. Также были установлены значения угловой скорости четырех лопастного бitera ω_{δ} в зависимости от скорости движения картофелекопателя V_k . Так при $V_k=1,1...1,7 \text{ м/с}$ угловая скорость четырех лопастного бitera ω_{δ} должна находиться в пределах от 29 с^{-1} до $35,5 \text{ с}^{-1}$, что соответствует частоте вращения $n_{\delta}=277...339 \text{ мин}^{-1}$. За счет этого подача картофельного пласта бiterом на вершины рабочих органов первой секции будет происходить устойчиво, без сгруживания и без перебрасывания на последующие секции.

2.5 Обоснование рациональных кинематических режимов ротационных рабочих органов в зоне интенсивной сепарации

Структура картофельного пласта в значительной степени влияет на процесс его перемещения по исследуемой ротационной сепарирующей поверхности. Движение пласта по рабочим органам первых трех секций происходит частично связанным почвенным слоем. Так, из-за наличия в нем большого количества почвенных и растительных примесей практически не происходит прямого контакта клубней с выступами роторов. Следовательно, для данных секций можно применить повышенные режимы вращения и сепарации без существенного повышения травмирования убираемого картофеля. Исследования [23,85] указывают на то, что именно в начале ротационного сепаратора просеивается наибольшее количество примесей. Поэтому первые три секции ротационной рабочей поверхности примем как зону интенсивной сепарации. При этом В.М. Алакин, Я.И. Верменко, И.Н. Масленков, С.С. Остроумов указывают на преимущество безотрывной траектории движения картофельного пласта по ротационным поверхностям. Она обеспечивает высокую сепарирующую способность и исключает перебрасывание через соседние секции. Таким образом возрастает просеиваемость почвы, снижается энергоемкость картофелеуборочной машины, повреждаемость картофеля, нагрузка и износ рабочих органов сепаратора [4,23,57,71]. Поэтому при исследовании рабочего процесса примем безотрывную траекторию как необходимое условие эффективной работы ротационного сепаратора.

В интенсивной зоне полнота сепарации в значительной степени зависит от скорости подачи картофельного пласта V_0 и окружной скорости V_1 рабочих поверхностей роторов. Из-за большой толщины поступающего материала выравнивание скоростей нижнего и верхнего слоев будет происходить неравномерно. Верхняя часть пласта будет обладать более значительной начальной скоростью и кинетической энергией, что позволит ей переходить с первой секции на вторую и на третью без торможения во впадинах между ними.

Перемещение нижней части пласта будет происходить перевалочно рабочими органами первой, второй и третьей секций (рисунок 38). В данном случае процессы перемещения и сепарации осуществляются в наиболее сложных условиях и сильно зависят от конструктивных параметров и частоты вращения роторов n_1 . Поэтому обоснование режимов работы ротационных секций в зоне интенсивной сепарации производили на основе анализа перемещения нижней части пласта. Для этого построили схему движения картофельного пласта между роторами первой и второй секций (рисунок 38).

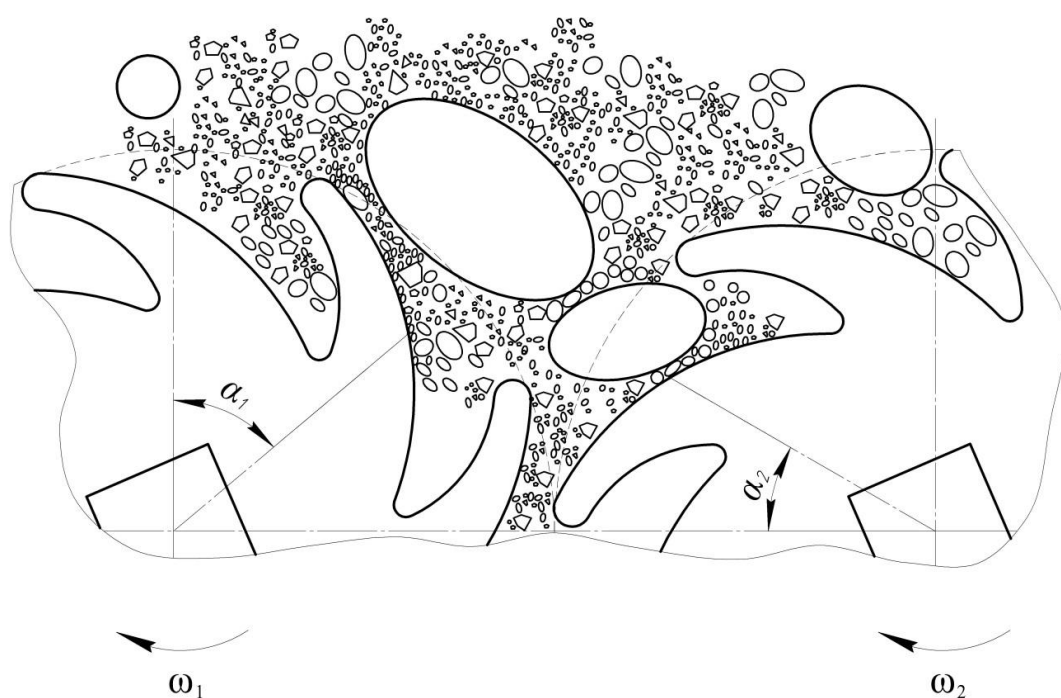


Рисунок 38 – Схема движения картофельного пласта между роторами первой и второй секций

Из схемы (рисунок 38) видно, что захват части пласта выступами рабочих органов второй секции начинает происходить при угле поворота ротора $\alpha_2 = 40 \dots 44^\circ$. Для этого угол схода α_1 должен находиться в диапазоне $36 \dots 42^\circ$. Приняв по схеме (рисунок 38) значения углов α_1 и α_2 рассчитали, с учетом ранее определенных конструктивных параметров ротационных рабочих органов, угловую скорость первых трех секций сепаратора, где $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$.

Для этого спроецировали все силы, действующие на часть пласта, на оси x и y (рисунок 39). В момент попадания на первую секцию сепаратора картофельный пласт обладает значительной толщиной и начальной скоростью. На перемещение верхнего и среднего слоев, обладающих небольшой плотностью, центробежная сила инерции практически не повлияет. Исходя из этого, в интенсивной зоне сепарации реакцией ее связи можно пренебречь.

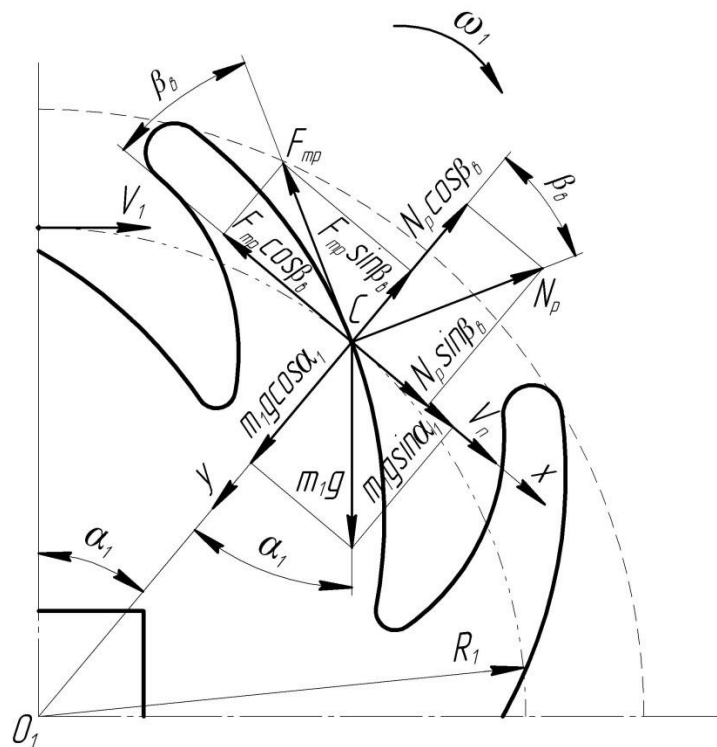


Рисунок 39 – Схема сил, действующих на часть картофельного пласта, находящуюся между двумя соседними выступами

Составили уравнение динамики для части картофельного пласта, находящейся между двумя соседними выступами [11,100]:

$$m_1 \cdot w_1 = G_1 + N_p + F_{mp}, \quad (47)$$

где m_1 - масса части картофельного пласта, кг;

w_1 - полное ускорение части картофельного пласта, m/c^2 ;

G_1 - сила тяжести, Н;

F_{mp} - сила трения скольжения, Н;

N_p - сила реакции поверхности выступа ротора, H .

Часть пласта, находящаяся между двумя выступами, имеет только одну одностороннюю связь, а при угле поворота $\alpha_1(0)=0^\circ$ начинает равноускорено перемещаться за счет своей начальной скорости V_0 и разгона пласта поверхностью выступа вплоть до момента отрыва. Исходя из этого, для определения рационального диапазона значений частоты вращения ротационных рабочих органов можно воспользоваться уравнением Эйлера для несвободных систем.

Спроектировав векторы внешних сил уравнения (47) на соответствующие оси получили следующие выражения:

$$\begin{cases} m_1 w_1 \cos(w_1, \tau) = G_1 \sin \alpha_1 - F_{mp} \cos \beta_\epsilon + N_p \sin \beta_\epsilon \\ m_1 w_1 \cos(w_1, n) = G_1 \cos \alpha_1 - F_{mp} \sin \beta_\epsilon - N_p \cos \beta_\epsilon \end{cases} \quad (48)$$

где g - ускорение свободного падения, m/c^2 ;

β_ϵ - угол наклона выступа, *градус*.

Из кинематики известно, что [11,100]:

$$w_1 \cos(w_1, \tau) = \frac{d^2 S}{dt^2} \quad (49)$$

$$w_1 \cos(w_1, n) = \frac{V_n^2}{R_1} \quad (50)$$

Подставляя (49), (50) в (48) можно записать систему уравнений движения части картофельного пласта:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 S}{dt^2} = m_1 g \sin \alpha_1 - F_{mp} \cos \beta_\epsilon + N_p \sin \beta_\epsilon \\ \frac{m_1 V_n^2}{R_1} = m_1 g \cos \alpha_1 - F_{mp} \sin \beta_\epsilon - N_p \cos \beta_\epsilon \end{cases} \quad (51)$$

где V_n - скорость движения части картофельного пласта по первой секции сепаратора, m/c ;

S - траектория движения части картофельного пласта;

R_1 - расстояние от центра ротора до середины выступа, m .

Модуль силы реакции N_p выразим из второго уравнения системы (51):

$$N_p = \frac{m_1 g R_1 \cos \alpha_1 - m_1 V_n^2}{R_1 (\cos \beta_e + f_p \sin \beta_e)} \quad (52)$$

В момент отделения части пласта, находящейся между двумя выступами ротора, ее реакция связи N_p будет равняться нулю. Исходя из этого, выразим скорость схода пласта V_n из второго уравнения системы (51):

$$V_n^2 = g R_1 \cos \alpha_1 \quad (53)$$

Скорость пласта V_n определим из первого уравнения системы (51). За начало отсчета дуговой координаты S примем положение пласта при угле поворота $\alpha_1 = 0^\circ$.

Траектория движения части картофелесодержащего пласта имеет вид:

$$S = O_1 C = R_1 \alpha_1 \quad (54)$$

Переведем первое уравнение системы (51) из второй степени в первую:

$$\frac{d^2 S}{dt^2} = R_1 \frac{d^2 \alpha_1}{dt^2} = R_1 \frac{d \omega_1}{dt} \quad (55)$$

Умножим и разделим выражение (55) на $d \alpha_1$:

$$R_1 \frac{d \omega_1}{dt} \cdot \frac{d \alpha_1}{d \alpha_1} = \omega_1 R_1 \frac{d \omega_1}{d \alpha_1} \quad (56)$$

Подставим (56) в первое уравнение системы (51):

$$m_1 \omega_1 R_1 \frac{d \omega_1}{d \alpha_1} = m_1 g \sin \alpha_1 + N_p (\sin \beta_e - f_p \cos \beta_e) \quad (57)$$

Проинтегрируем уравнение (57):

$$\begin{aligned} \int m_1 R_1 \omega_1 d \omega_1 &= \int (m_1 g \sin \alpha_1 + N_p (\sin \beta_e - f_p \cos \beta_e)) d \alpha_1 \\ m_1 R_1 \frac{\omega_1^2}{2} &= N_p (\sin \beta_e - f_p \cos \beta_e) - m_1 g \cos \alpha_1 + C \end{aligned} \quad (58)$$

Выразим угловую скорость части картофельного пласта ω_1 через его окружную скорость V_n :

$$\frac{m_1 V_n^2}{2 R_1} = N_p (\sin \beta_e - f_p \cos \beta_e) - m_1 g \cos \alpha_1 + C \quad (59)$$

Значение коэффициента C определим по начальным условиям $\alpha_1(0)=0^\circ$; $V_n(0)=V_0$:

$$C = \frac{m_1 V_0^2}{2R_1} - N_p (\sin \beta_e - f_p \cos \beta_e) + m_1 g \quad (60)$$

Подставим значение коэффициента C в уравнение (59):

$$\frac{m_1 V_n^2}{2R_1} = \frac{m_1 V_0^2}{2R_1} + m_1 g - m_1 g \cos \alpha_1 \quad (61)$$

Выразим V_n^2 :

$$V_n^2 = V_0^2 + 2R_1 g - 2R_1 g \cos \alpha_1 \quad (62)$$

Приравняем уравнения (53) и (62):

$$R_1 g \cos \alpha_1 = V_0^2 + 2R_1 g - 2R_1 g \cos \alpha_1 \quad (63)$$

Из получившегося выражения найдем минимальное значение $V_{0\min}$:

$$V_{0\min} = \sqrt{R_1 g (3 \cos \alpha_1 - 2)} \quad (64)$$

Подставляя в уравнение (64) $R_1=0,12$ м; $\alpha_1=42^\circ$ определяем, что минимальное значение $V_{0\min} \approx 1$ м/с. Очевидно, что начальная скорость V_0 поступающего на ротационную сепарирующую поверхность материала должна быть больше $V_{0\min}$. Реальное значение V_0 соответствует скорости схода части картофельного пласта с лопасти четырех лопастного битера, т.е. $V_0=V_c$. Для расчета примем максимальное значение $V_c=2$ м/с.

$$V_n = \sqrt{V_0^2 + 2R_1 g (1 - \cos \alpha_1)} \quad (65)$$

Подставляя полученные величины в уравнение (65) получили, что при $\alpha_1=42^\circ$ скорость схода $V_n \approx 2,5$ м/с. Следовательно, для более плавного выравнивания скорости поступающего пласта и окружной скорости ротационных рабочих органов первой секции угловая скорость ω_1 должна быть не менее:

$$\omega_1 \geq \frac{V_n}{R_1} \quad (66)$$

Из выражения (66) находим, что угловая скорость ротационных рабочих органов первой, второй и третьей секций ω_1 должна быть в пределах от 23 с^{-1} до $27,2 \text{ с}^{-1}$, что соответствует частоте вращения $n_1=220\dots260 \text{ мин}^{-1}$.

В результате исследований рабочих процессов зоны интенсивной сепарации были составлены аналитические зависимости, которые позволили определить необходимые пределы частоты вращения ротационных рабочих органов n_1 . Полученный диапазон режимов $n_1=220\dots260 \text{ мин}^{-1}$ позволит первым трем рядам роторов устойчиво перемещать картофельный пласт без сгруживания и без перебрасывания через соседние секции. Данные значения должны обеспечить интенсивное удаление растительных и почвенных примесей и предотвратить защемление клубней между соседними рядами ротационных рабочих органов.

2.6 Исследование процесса перемещения компонентов картофельного вороха в зоне окончательной очистки

Экспериментальные исследования различных конструкций ротационных сепараторов показали, что их сепарирующая способность напрямую зависит от количества рабочих секций, т.е. от длины и ширины рабочей поверхности. Причем, в независимости от типа устройства и режима его работы, на первых трех секциях просеивается до 50...60% примесей [23,74,85]. По данным [85] последние рабочие секции ротационных сепараторов более интенсивно взаимодействуют с отдельными компонентами картофельного вороха. На них частично разрушаются и просеиваются более твердые почвенные комки, а клубни и не разрушаемые примеси транспортируются к выгрузному устройству. Исходя из этого, конструктивные параметры и режимы работы роторов заключительных секций будут определять характер одиночного перемещения компонентов картофельного вороха и сепарации примесей. Обозначим область исследуемого ротационного сепаратора от четвертой до пятой секции как зону окончательной очистки.

Транспортирование компонентов картофельного вороха в данной зоне будет происходить по отдельности и с частичным отрывом от рабочей поверхности. Из-за отсутствия демпфирующего почвенного слоя увеличится сила соударения клубней с поверхностями ротационных рабочих органов [54]. К тому же, в случае попадания транспортируемого слоя во впадину между роторами соседних секций, существенно возрастет и общее количество соударений его компонентов. Это является следствием того, что для выхода из зоны впадины клубням и не разрушенным примесям необходимо обладать значительной кинетической энергией, которую они могут приобрести только в результате дополнительного взаимодействия с выступами роторов. Поэтому для минимизации силы соударений компонентов картофельного вороха между собой и с поверхностями выступов траектория их движения должна проходить по вершинам роторов (рисунок 40).

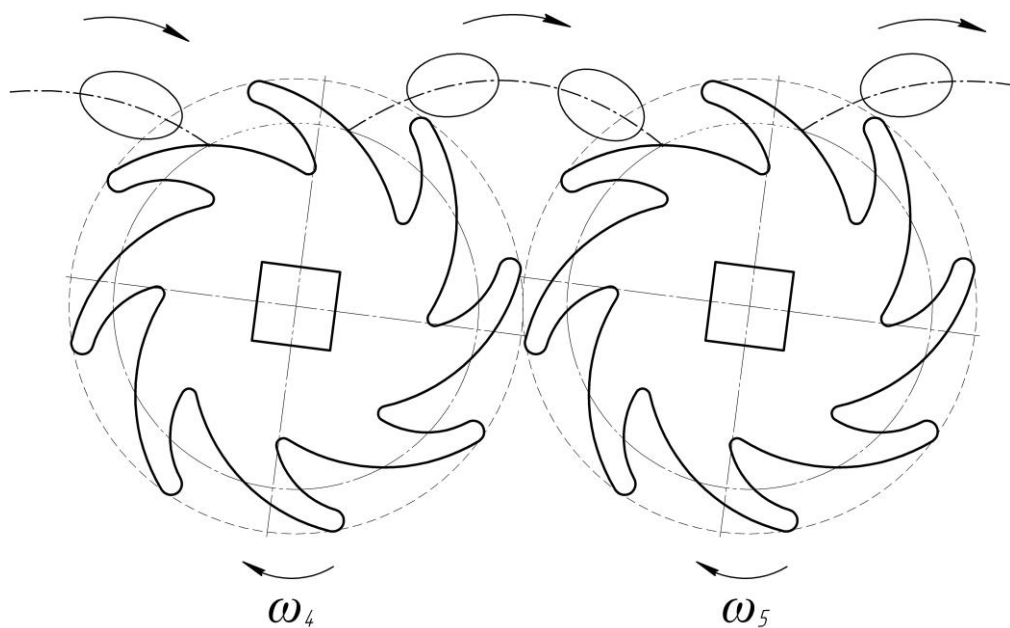


Рисунок 40 – Рациональная траектория движения компонентов картофельного вороха в зоне окончательной очистки

Принятие и исполнение такого условия позволит упорядочить процесс транспортирования картофельного вороха и уменьшит повреждаемость клубней.

На основании вышесказанного определили рациональные значения угловой скорости роторов ω_4 в зоне окончательной очистки.

Данные исследования разделили на два этапа. На первом построили схему сил, действующих на компонент картофельного вороха при его соударении с выступом ротационного рабочего органа (рисунок 41), и определили, с помощью теоремы об изменении количества движения механической системы при ударе, значение ударной нормальной реакции N_{cp} . На втором этапе составили аналитические зависимости проекций $\tilde{U}_x$, $\tilde{U}_y$ скорости отражения $\tilde{U}$ от скорости соударения V_s (67) и определили значения рациональной угловой скорости рабочих органов ω_4 зоны окончательной очистки [11,100].

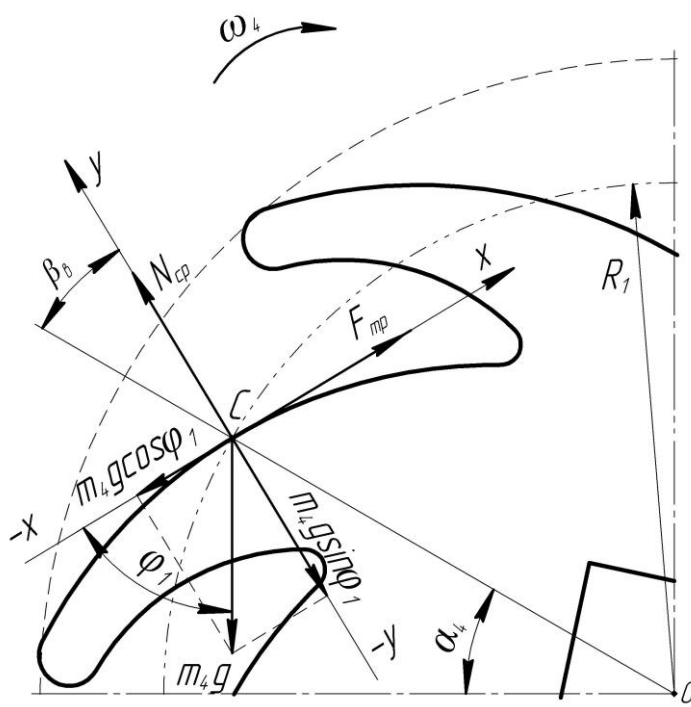


Рисунок 41 – Схема сил, действующих на компонент картофельного вороха при его соударении с выступом ротационного рабочего органа

На первом этапе составили уравнения, определяющие количество движения компонента вороха в проекциях на оси x , y :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n m_4 \tilde{U}_x - \sum_{i=1}^n m_4 V_x = \sum_{i=1}^n S_{ix}^E \\ \sum_{i=1}^n m_4 \tilde{U}_y - \sum_{i=1}^n m_4 V_y = \sum_{i=1}^n S_{iy}^E \end{cases} \quad (67)$$

где $\tilde{U}_x, \tilde{U}_y$ - проекции скорости отражения $\tilde{U}$ компонента вороха на заданные оси x, y ;

V_x, V_y - проекции скорости соударения V_s на оси x, y ;

S_{ix}^E, S_{iy}^E - проекции на оси x, y ударного импульса i -ой внешней силы, действующей в течение промежутка времени τ_y ;

m_4 - масса отдельного компонента картофельного вороха, кг.

Уравнения, определяющие изменение количества движения компонента картофельного вороха при его соударении с поверхностью выступа, приняли следующий вид:

$$\begin{cases} m_4 \tilde{U}_x - m_4 V_x = \int_0^{\tau_y} (F_{mp} - m_4 g \cos \varphi_1) d\tau_y \\ m_4 \tilde{U}_y - m_4 V_y = \int_0^{\tau_y} (N_{cp} - m_4 g \sin \varphi_1) d\tau_y \end{cases} \quad (68)$$

где φ_1 - угол равный сумме углов α_4 и β_6 , градус;

α_4 - угол поворота четвертой секции сепарирующей поверхности, градус.

Для решения применим к (68) теорему о среднем значении интеграла:

$$\begin{cases} m_4 \tilde{U}_x - m_4 V_x = F_{mp} \tau_y - m_4 g \tau_y \cos \varphi_1 \\ m_4 \tilde{U}_y - m_4 V_y = N_{cp} \tau_y - m_4 g \tau_y \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (69)$$

где N_{cp} - среднее значение ударной нормальной реакции, H ;

F_{mp} - сила трения скольжения, H .

Учитывая направление вращения, выразим скорость отражения $\tilde{U}_y$ через скорость соударения V_y :

$$\tilde{U}_y = -k_\epsilon V_y \quad (70)$$

где k_ϵ - коэффициент восстановления резины.

Тогда второе уравнение системы (69) можно записать в виде:

$$m_4 g \tau_y \sin \varphi_1 - m_4 (1 + k_\epsilon) V_y = N_{cp} \tau_y \quad (71)$$

Подставляя (71) в (69) получаем:

$$\begin{cases} \tilde{U}_x = V_x + f_p g \tau_y \sin \varphi_1 - f_p (1 + k_\epsilon) V_y - g \tau_y \cos \varphi_1 \\ \tilde{U}_y = V_y - (1 + k_\epsilon) V_y \end{cases} \quad (72)$$

Проекция скорости отражения компонента вороха на ось y , выраженная из (69), имеет вид:

$$\tilde{U}_y = V_y + \frac{N_{cp} \tau_y}{m_4} - g \tau_y \sin \varphi_1 \quad (73)$$

Подставим уравнение (73) в (72):

$$V_y + \frac{N_{cp} \tau_y}{m_4} - g \tau_y \sin \varphi_1 = V_y - (1 + k_\epsilon) V_y \quad (74)$$

Полученное выражение (75), описывающее среднее значение ударной нормальной реакции N_{cp} , далее используем для расчета угловой скорости рабочих органов ω_4 зоны окончательной очистки, учитывая при этом процесс соударения и прогиба выступа ротора.

$$N_{cp} = \frac{m_4}{\tau_y} (g \tau_y \sin \varphi_1 - (1 + k_\epsilon) V_y) \quad (75)$$

Во время соударения компонентов вороха с ротационными рабочими органами выступы последних прогибаются от ударной нормальной реакции N_{cp} . Это происходит в течение определенного промежутка времени τ_y . Следовательно, ударную нормальную реакцию N_{cp} можно также рассчитать с помощью дифференциального уравнения изогнутой оси балки, которой и является выступ ротора.

Приравнявая уравнения (21) и (75) определили время контакта компонента вороха с выступом ротационного рабочего органа τ_y :

$$\tau_y = \frac{L_6^3 m_4 (1 + k_6) V_y}{L_6^3 m_4 g \sin \varphi_1 - 3 E_p I_6 S_6} \quad (76)$$

Угловую скорость рабочих органов зоны окончательной очистки ω_4 выразим через зависимости проекций скорости отражения $\tilde{U}_x, \tilde{U}_y$ от скорости соударения V_S . Перемещение картофельного вороха связанной массой прекращается на третьей секции зоны интенсивной сепарации. Его компоненты отрываются от ротационных рабочих органах при угле поворота $\alpha_3=132^\circ$, со скоростью отрыва $V_n=2,5$ м/с. Исходя из этого, клубни и не разрушенные почвенные примеси будут попадать на выступы четвертой секции (зоны окончательной очистки) при угле поворота $\alpha_4=42\dots 50^\circ$ и со скоростью $V_a=2,5$ м/с. Принимая во внимание все вышесказанное, рассчитаем значение ударной нормальной реакции N_{cp} . Проекции V_x, V_y скорости соударения V_S компонента картофельного вороха с поверхностью выступа ротора определим через план скоростей в момент контакта (рисунок 42).

Ось y направим в сторону, противоположную скорости отражения $\tilde{U}$. Так как соударение начинается при угле поворота четвертой секции сепаратора на $\alpha_4=42\dots 50^\circ$, угол падения компонента картофельного вороха $\psi_n \approx 45^\circ$. Принимая во внимание вышесказанное, составим уравнения для проекций скорости соударения V_x, V_y :

$$\begin{cases} V_x = V_a \cos \psi_n + V_4 \cos \beta_6 \\ V_y = V_a \sin \psi_n - V_4 \sin \beta_6 \end{cases} \quad (77)$$

где V_4 - окружная скорость середины выступа (при радиусе $R_1=0,12$ м) ротационного рабочего органа сепаратора, м/с.

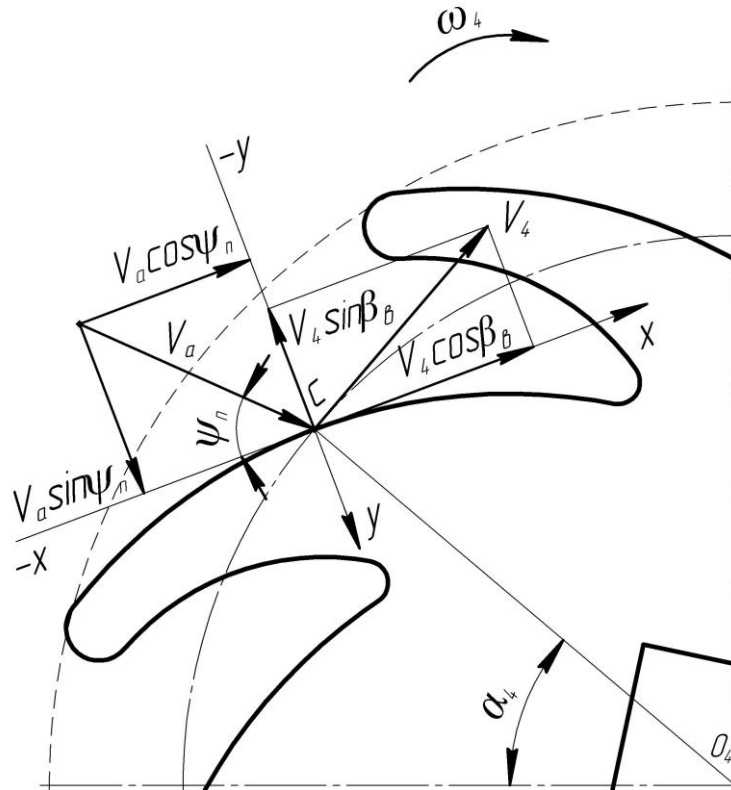


Рисунок 42 – Схема скорости соударения V_s компонента картофельного вороха с выступом ротационного рабочего органа

Выражая в (77) окружную скорость V_4 через угловую скорость ω_4 получаем:

$$\begin{cases} V_x = V_a \cos \psi_n + \omega_4 R_1 \cos \beta_\theta \\ V_y = V_a \sin \psi_n - \omega_4 R_1 \sin \beta_\theta \end{cases} \quad (78)$$

Процесс соударения компонента картофельного вороха с выступом ротора происходит в течение определенного промежутка времени τ_y и при повороте ротора на угол α_4 . Тогда схема скорости отражения клубня будет иметь вид, представленный на рисунке 43.

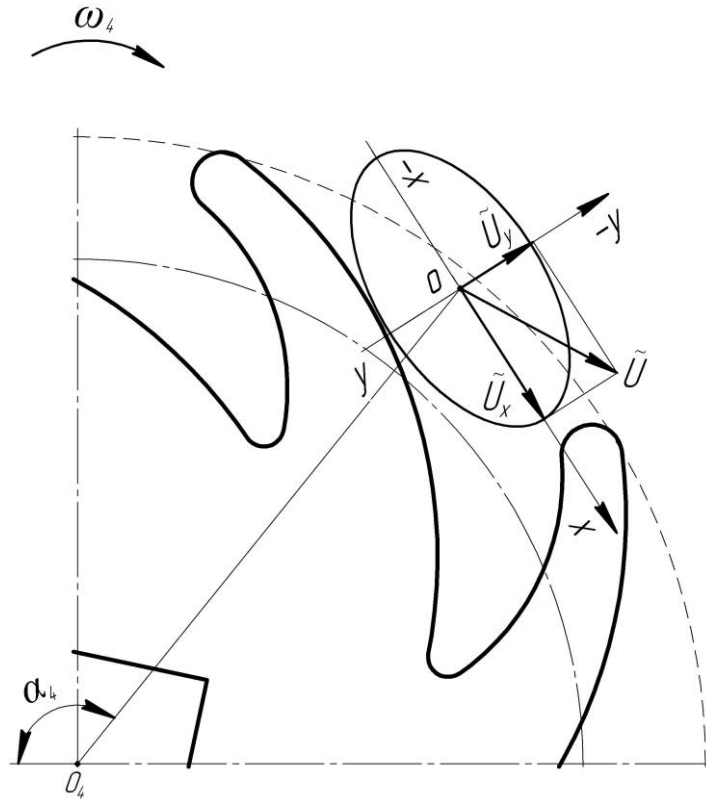


Рисунок 43 – Схема скорости отражения $\tilde{U}$ компонента картофельного вороха

Подставляя полученные уравнения в (69) находим значения проекций скорости отражения $\tilde{U}_x$, $\tilde{U}_y$.

$$\begin{cases} \tilde{U}_x = V_a \cos \psi_n + \omega_4 R_1 \cos \beta_e + \frac{1}{m_4} F_{mp} \tau_y - g \tau_y \cos \varphi_1 \\ \tilde{U}_y = V_a \sin \psi_n - \omega_4 R_1 \sin \beta_e + \frac{1}{m_4} N_{cp} \tau_y - g \tau_y \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (79)$$

Высота вершины b_e и ширина B выступа ротационного рабочего органа составляют 0,015 м и 0,025 м соответственно. Следовательно, его момент инерции равен $I_e = 3,375 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$. Для используемой марки резины модуль упругости $E_p = 4,4 \text{ МПа}$, а коэффициент восстановления $k_e = 0,4$. Для расчетов средняя масса отдельного компонента картофельного вороха m_4 была выбрана равной 0,16 кг, расчетная величина прогиба выступа ротора $S_e = 1,6 \text{ мм}$ (пункт 2.3).

Соударение начинается при угле поворота секции сепаратора $\alpha_4=42\dots50^\circ$ и скорости падения компонента вороха $V_a=2,5 \text{ м/с}$.

Подставляя полученные значения поочередно в формулы (69), (76), (77), (78) и (79) определили, что в зоне окончательной очистки перемещение клубней с минимальным отрывом будет происходить при $\omega_4=21\dots24 \text{ с}^{-1}$, что соответствует частоте вращения $n_4=200\dots230 \text{ мин}^{-1}$. Причем проекции скорости отражения $\tilde{U}_x, \tilde{U}_y$ равны $3,8 \text{ м/с}$ и $0,2 \text{ м/с}$ соответственно, а время удара τ_y составило $0,07 \text{ с}$. За время удара τ_y секция сепаратора повернется примерно на $82\dots87^\circ$, что соответствует длине рабочей зоны поверхности ротора.

В ходе исследования зоны окончательной очистки были получены зависимости проекций скорости отражения $\tilde{U}_x, \tilde{U}_y$ от угловой скорости ω_4 . Это позволило определить траекторию перемещения картофельного вороха в данной области сепаратора и угол захвата материала выступами рабочих органов последующих секций, равный $42\dots50^\circ$. В результате этого можно сделать вывод, что процесс устойчивого перемещения компонентов картофельного вороха будет реализован при угловой скорости ротационных рабочих органов $\omega_4=21\dots24 \text{ с}^{-1}$ или частоте вращения $n_4=200\dots230 \text{ мин}^{-1}$.

2.7 Выводы

1. В результате теоретических исследований была обоснована технологическая схема и компоновка конструкции картофелекопателя в составе приемно-подающего битера и ротационного сепаратора, а также определены параметры подкапывающих лемехов: угол подкапывания $\alpha=20^\circ$, длина $L=480 \text{ мм}$, ширина $B_\lambda=580 \text{ мм}$ и внешние диаметры битера $D_\delta=300 \text{ мм}$ и ротационного рабочего органа $D_p=300 \text{ мм}$, количество рабочих секций ротационной сепарирующей поверхности N_c приняли равным 5 шт .

2. Выведены зависимости и определены основные рабочие параметры ротора: общее количество выступов $N_\delta=8 \text{ шт.}$, угол их наклона $\beta_\delta=28,5^\circ$, высота

$H_6=62$ мм, длина $L_6=130$ мм, радиус скругления $R_6=120$ мм и высота вершин выступов $b_6=15$ мм.

3. В результате исследования распределения нагрузки пласта и деформаций в выступе ротора было определено, что при рациональной толщине ротора $B=25$ мм максимальная величина прогиба выступов S_6 составляет 1,6 мм.

4. Выведена зависимость динамики подачи пласта битем и определена его частота вращения $n_6=277...339$ мин⁻¹ для устойчивой подачи и разрушения пласта в зависимости от скорости движения картофелекопателя $V_k=1,1...1,7$ м/с.

5. Выведены зависимости для исследования процесса перемещения картофельного пласта в зонах интенсивной сепарации и окончательной очистки и определены диапазоны рациональных значений частоты вращения роторов соответственно для первой зоны $n_1=220...260$ мин⁻¹ и для второй $n_4=200...230$ мин⁻¹.

3. Программа и методика экспериментальных исследований

3.1 Программа экспериментальных исследований

В результате теоретических исследований была обоснована общая схема ротационного картофелекопателя, определены параметры конструкции и режимы работы четырех лопастного битера и ротационных рабочих органов. Для проверки теоретических предпосылок, а также для обоснования конструктивных параметров и режимов работы битера и ротационного сепаратора разработали программу и методику экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования планировалось провести в полевых условиях Нечерноземной зоны РФ. Программа исследований включала:

- исследование влияния расчетных параметров конструкции и режимов работы битера и ротационного сепаратора на устойчивость, динамику перемещения картофельного пласта и сепарирующую способность;
- исследование совместного действия кинематических параметров битера и ротационного сепаратора, а также скорости движения картофелекопателя на полноту сепарации и определение их рациональных значений;
- определение основных эксплуатационных характеристик ротационного картофелекопателя на основе анализа его производительности, энергоемкости и повреждаемости картофеля.

3.2 Методика исследования устойчивости перемещения картофельного пласта и сепарирующей способности лопастного битера и ротационного сепаратора

Экспериментальные исследования предлагаемого картофелекопателя на предмет устойчивости перемещения картофельного пласта лопастным битером и ротационным сепаратором, с определением их сепарирующей способности,

проводили в полевых условиях на производственной базе ФГБНУ «Калужский Научно-Исследовательский Институт Сельского Хозяйства», по классической методике [13,19,20,34,35,99], соответствующей ГОСТ Р 52778-2007, ГОСТ Р 54784-2011 и СТО АИСТ 8.5–2010 (рисунок 44).



Рисунок 44 – Поле с посадками картофеля в ФГБНУ «Калужский Научно-Исследовательский Институт Сельского Хозяйства»

Для проведения опытов были выбраны различные участки полей со средними суглинистыми и серыми лесными почвами (рисунок 44). Картофель сортов «Удача», «Калужский» и «Ред-Скарлетт» располагался в рядах высотой 21 см и с междурядьем 75 см. Эксперименты проводились в начале сентября 2016 г., в сухую погоду и при средней температуре воздуха 14...16°C. Влажность почвы составляла 9,3...12,8%, а твердость 0,39...0,44 МПа. Средняя урожайность достигала 27,5 т/га.

Согласно теоретическим исследованиям [1,8,25,65] четырех лопастной бита, при рабочей скорости движения картофелекопателя, должен оказывать значительное динамическое воздействие на подкопанный пласт для разрушения его структуры и подачи на сепарирующую поверхность. Поэтому методика исследования четырех лопастного бита заключалась в визуальной оценке интенсивности разрушения структуры картофельного пласта, а также устойчивости его приема, перемещения и подачи на вершины рабочих органов первой секции ротационного сепаратора в зависимости от рабочей скорости движения картофелекопателя.

В предлагаемом картофелекопателе основная часть почвенных и растительных примесей будет удаляться ротационным сепарирующим устройством. Оно, в отличие от сепараторов [23,57,71,97], имеет компоновку секций без перекрытия выступов роторов соседних рядов. За счет этого в предлагаемом сепарирующем устройстве образуются впадины между роторами соседних секций, в которых возможно снижение скорости перемещения картофельного пласта или его сгуживание. Поэтому данная методика предусматривала исследование процесса перемещения картофельного пласта с одной секции на другую методом цифровой видеосъемки.

При проведении экспериментальных исследований, вначале, выбирали рабочую скорость движения картофелекопателя V_k , а затем устанавливали частоту вращения бита n_b и частоту вращения ротационных рабочих органов n_p . Их диапазоны подбирались на основании результатов теоретических исследований, проведенных во втором разделе данной работы. Так для опытов скорость движения картофелекопателя V_k приняли равной 1,1; 1,4; 1,7 м/с, а значения частоты вращения бита n_b и ротационных рабочих органов n_p соответственно 270; 300; 330 мин^{-1} и 200; 230; 260 мин^{-1} . Изменение частоты вращения основных рабочих органов производили путем замены звездочки на промежуточном валу привода ротационного картофелекопателя.

В качестве уточняемых режимов работы ротационного картофелекопателя были приняты значения кинематических параметров, при которых лопастной

бита производил бы устойчивый прием, перемещение, разрушение структуры и подъем подкопанного пласта на рабочие органы первой секции сепарирующей поверхности. Выбор рациональных режимов выполнили на основе анализа результатов цифровой видеосъемки, путем визуальной оценки устойчивости перемещения картофельного пласта лопастным битами и ротационным сепаратором, особенно в зонах впадин между секциями. Сепарирующую способность картофелекопателя оценивали на основании анализа фотоснимков на предмет сброса с последней секции сепаратора почвенных примесей, которые должны были выделяться сепаратором, и потерь клубней под слоем отсепарированной почвы.

3.3 Методика экспериментальных исследований по определению режимов работы ротационного картофелекопателя

Данный этап экспериментальных исследований в полевых условиях заключался в исследовании совместного действия основных кинематических параметров рабочих органов ротационного картофелекопателя на процесс сепарации и в определении их рациональных значений. Опыты планировали выполнить по методике проведения многофакторного эксперимента. В качестве критерия оптимизации была выбрана полнота сепарации примесей S_c , которая является главной величиной, определяющей качество работы картофелеуборочных машин [13,20,39].

В качестве основных кинематических параметров ротационного картофелекопателя приняли:

- скорость работы ротационного картофелекопателя V_k , м/с;
- частоту вращения приемно-подающего бита n_b , мин⁻¹;
- частоту вращения ротационных рабочих органов n_p , мин⁻¹.

Экспериментальные исследования по определению кинематических параметров ротационного картофелекопателя провели в 2017 г. и 2018 г. на полевых участках ФГБНУ «Калужский Научно-Исследовательский Институт

Сельского Хозяйства». Влажность почвы составляла 8,5...11,8%, остальные почвенно-климатические условия остались такими же, как и в 2016-м году.

К наиболее значимым параметрам, влияющим на полноту сепарации примесей, относятся кинематические параметры лопастного битера и рабочих органов ротационного сепаратора, а также скорость работы ротационного картофелекопателя V_k . Согласно [1,8,25,65] в процессе работы ротационного картофелекопателя четырех лопастной битер должен разрушать структуру, а также обеспечивать устойчивый прием, перемещение и подъем картофелесодержащего пласта на вершины рабочих органов первой секции.

В экспериментальном картофелекопателе большая часть почвенных и растительных примесей должна удаляться ротационным сепарирующим устройством. Исходя из вышесказанного, методика проведения многофакторного эксперимента будет соответствовать требованиям [20,35,39,90]. Главная задача заключается в определении рациональных значений кинематических параметров битера и ротационного картофелекопателя, при которых критерий оптимизации удовлетворяет требованиям [13,19,34,99].

Опыты были проведены в соответствии с программой планирования и методикой проведения многофакторного эксперимента [19,20,39,96]. Это позволило исследовать процесс работы ротационного картофелекопателя при различных условиях и сочетаниях кинематических параметров, а также обеспечило минимальную трудоемкость данного этапа экспериментальных исследований.

Полноту сепарации примесей S_c ротационным картофелекопателем рассчитывали по формуле [30,112]:

$$S_c = \frac{S_u - S_o}{S_u} \quad (80)$$

где S_u – масса сепарируемых примесей в картофельном пласте, кг;

S_o – масса невыделенных примесей в обработанном пласте, кг.

Предуборочное удаление ботвы не проводилось. Таким образом, предполагалось оценить вероятность наматывания растительных остатков на

ротационные рабочие органы и распорные втулки и определить влияние данного процесса на полноту сепарации примесей ротационным картофелекопателем.

3.4 Методика исследований по определению основных эксплуатационных характеристик ротационного картофелекопателя в полевых условиях

Экспериментальные исследования по определению основных эксплуатационных характеристик ротационного картофелекопателя были проведены на основе отраслевых методик эксплуатационно-технологической оценки, согласно ГОСТ 20915-2011, ГОСТ 23729-88, ГОСТ Р 52778-2007, ГОСТ Р 54784-2011 и СТО АИСТ 8.5–2010 [20,32,34,35,99]. Опыты также были проведены на полевых участках ФГБНУ «Калужский Научно-Исследовательский Институт Сельского Хозяйства» в 2018 г. Для проведения опытов были выбраны полевые участки с сортами картофеля «Удача», «Калужский» и «Ред-Скарлетт».

Первый этап экспериментальных исследований был выполнен по методике определения производительности ротационного картофелекопателя за 1 час эксплуатационного времени $W_{эк}$, га/ч [34]:

$$W_{эк} = W_0 K_{эк}, \quad (81)$$

где W_0 – производительность ротационного картофелекопателя за 1 час основного времени, га/ч;

$K_{эк}$ – коэффициент использования эксплуатационного времени ротационного картофелекопателя.

Производительность ротационного картофелекопателя за 1 час основного времени W_0 рассчитали по формуле [34]:

$$W_0 = \frac{F}{T_1}, \quad (82)$$

где F – объем работы за период наблюдения, га;

T_1 – основное время за период наблюдения, ч.

На втором этапе исследований определили удельный расход топлива трактором МТЗ-80 при его работе в комплексе с ротационным картофелекопателем q_m , $кг/га$. Измерения проводили посредством расходомера DFM 100AK. Удельный расход топлива q_m рассчитали исходя из уравнения (83) [34]:

$$q_m = \frac{Q_1 T_{1H} + Q_{21} T_{21H} + Q_{31} T_{31X} + Q_{41} T_{41X}}{F_H}, \quad (83)$$

где $T_{1H}, T_{21H}, T_{31X}, T_{41X}$ – соответственно основное время под нагрузкой, на повороты, холостую работу машины (переезды), холостую работу двигателя, ч;

$Q_1, Q_{21}, Q_{31}, Q_{41}$ – соответственно часовой расход топлива под нагрузкой, на поворотах, при холостой работе машины (при переездах), при холостой работе двигателя, $кг/ч$;

F_H – объем выполненной работы (наработка), $га$.

Третий этап экспериментальных исследований по определению основных эксплуатационных характеристик ротационного картофелекопателя провели по методике определения повреждаемости картофеля [21,24,26] в зависимости от режимов работы ротационного картофелекопателя.

В данном случае порядок и методика проведения опытов будут такими же, как и в методике по определению устойчивости транспортирования картофельного пласта лопастным битером и ротационным сепаратором (пункт 3.2). При каждом сочетании основных факторов было произведено исследование повреждаемости картофеля. После выкапывания картофеля с одного ряда подсчитывали количество поврежденных клубней. К травмированным относили картофель с 20% повреждениями кожуры, а также раздавленный, надрезанный и с потемнениями от ушибов глубиной более 5 мм. Клубни массой менее 20 гр. в учет не принимались. Измерения повреждений и размерно-массовых характеристик производили с помощью весов МК–15,2–ТН-21 и стандартного штангенциркуля.

3.5 Планирование многофакторного эксперимента по определению режимов работы ротационного картофелекопателя

Основная задача данного многофакторного эксперимента заключается в построении интерполяционной формулы для предсказания значений полноты сепарации примесей S_c , зависящей от основных факторов и характеризующей процесс работы ротационного картофелекопателя. Планирование исследований позволит установить минимально необходимое количество опытов, условия их проведения и методы математической обработки результатов [19,39,90,96].

В качестве параметра оптимизации приняли полноту сепарации примесей S_c . Она удовлетворяет всем предъявляемым требованиям, т.е. является количественной, однозначной в статистическом смысле, универсальной и измеряемой величиной, а также выражается одним числом.

В общем виде функцию отклика y приняли в виде:

$$y = f(x_1, x_2, x_3), \quad (84)$$

где x_1, x_2, x_3 - независимые переменные факторы.

К основным факторам, влияющим на выбранный параметр оптимизации, относятся:

- V_k - скорость движения ротационного картофелекопателя, $м/с$;
- n_b - частота вращения приемно-подающего бitera, $мин^{-1}$;
- n_p - частота вращения ротационных рабочих органов, $мин^{-1}$.

В ходе теоретических исследований были определены диапазоны значений основных факторов. Рабочая скорость ротационного картофелекопателя V_k , а также значения частоты вращения приемно-подающего бitera n_b и ротационных рабочих органов n_p должны находиться в пределах $1,1...1,7 м/с$, $270...330 мин^{-1}$ и $200...260 мин^{-1}$ соответственно. Выбранные величины совместимы и независимы друг от друга, а также являются управляемыми и непрерывно воздействуют на объект исследования.

Для каждого из этих факторов было выбрано по два уровня, в пределах которых они будут варьироваться в эксперименте. Верхний уровень соответствовал максимальному, а нижний минимальному значениям факторов. Относительно нулевого уровня они располагались с определенными интервалами варьирования (таблица 4).

Для упрощения записи условий опытов и облегчения обработки экспериментальных данных уровни факторов были закодированы. В кодированном виде верхний уровень обозначили «+1», основной «0», а нижний «-1». Кодированное значение i -го фактора определяли из выражения:

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_i^0}{\varepsilon_i}, \quad (85)$$

где $\tilde{x}_i$ - натуральное значение i -го фактора,

$\tilde{x}_i^0$ - натуральное значение основного уровня i -го фактора;

ε_i - интервал варьирования i -го фактора.

Таблица 4 – Кодированные значения основных факторов

Уровень	$x_1, \text{м/с}$	$x_2, \text{мин}^{-1}$	$x_3, \text{мин}^{-1}$
Верхний (+)	1,7	330	260
Нулевой (0)	1,4	300	230
Нижний (-)	1,1	270	200

Экспериментальные исследования в полевых условиях проводили в соответствии с центральным композиционным планом второго порядка.

Число всех сочетаний уровней факторов N (количество опытов) определили из выражения:

$$N = 2^k + 2k + n_0, \quad (86)$$

где n_0 – число опытов в центре плана;

k - число факторов.

Таким образом, общее число опытов составило 15 шт. Для получения центрального композиционного плана для трех факторов к полному факторному

эксперименту 2^3 добавили шесть «звездных» точек с координатами $(+\alpha; 0; 0)$; $(-\alpha; 0; 0)$; $(0; +\alpha; 0)$; $(0; -\alpha; 0)$; $(0; 0; +\alpha)$; $(0; 0; -\alpha)$ и одну нулевую точку $(0; 0; 0)$ в центре плана. Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 5.

Таблица 5 - Матрица планирования эксперимента

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}

Согласно [20,96] в предложенной матрице центрального композиционного плана второго порядка для трех факторов не все столбцы ортогональны. Поэтому они были преобразованы. Переменная x_i^2 была заменена новой переменной x'_i .

$$x'_i = x_i^2 - \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}{N} = x_i^2 - \bar{x}_i^2 \quad (87)$$

После замены x_i^2 на x'_i все суммы построчных произведений столбцов будут равны нулю.

Значение «звездного» плеча α для экспериментов с тремя факторами составляет 1,215 [96]. Исходя из выражения (87) новые переменные x'_1, x'_2, x'_3 будут соответственно равны $x'_1 = x_1^2 - 0,73$; $x'_2 = x_2^2 - 0,73$; $x'_3 = x_3^2 - 0,73$. Матрица ортогонального планирования для трех факторов представлена в таблице 6.

Таблица 6 - 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}

Уравнение регрессии, для экспериментальных исследований по центральному композиционному плану второго порядка, представляет собой полином второго порядка:

$$y = b'_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11}(x_1^2 - 0,73) + b_{22}(x_2^2 - 0,73) + b_{33}(x_3^2 - 0,73), \quad (88)$$

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

Для каждой строки матрицы (таблицы 6) нашли среднее арифметическое значение параметра оптимизации $\bar{y}_j$:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{ju}, \quad (89)$$

где n - число параллельных опытов;

u - номер параллельного опыта;

y_{ju} - значение параметра оптимизации в u -м параллельном опыте j -й строки матрицы.

Свободный член рассчитали по формуле:

$$b'_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j \quad (90)$$

Коэффициенты регрессии определили независимо друг от друга по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}, \quad (91)$$

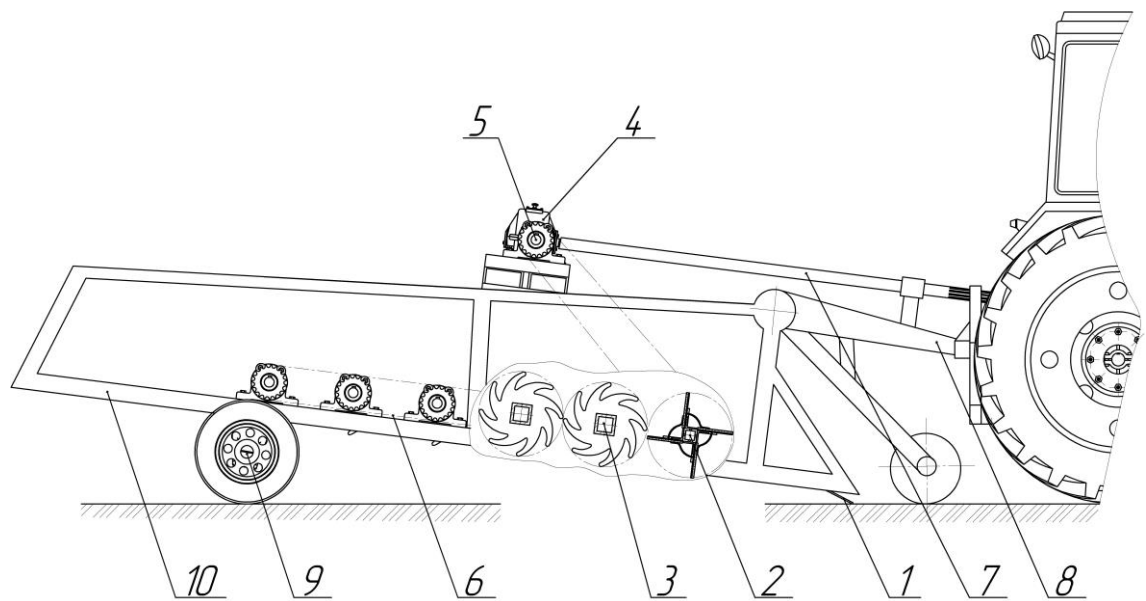
где x_{ij} - элементы соответствующего столбца матрицы;

y_j - значение параметра оптимизации в j -м опыте.

Для оценки адекватности полученного уравнения проверили значимость коэффициентов регрессии. Для этого определили их доверительные интервалы и дисперсии. Далее производили расчет дисперсии адекватности и с ее помощью определяли критерий Фишера, который характеризует адекватность рассматриваемой модели.

3.6 Объект исследований, измерительные приборы и аппаратура

Для проведения исследований разработали конструкторскую документацию, на основании которой был изготовлен экспериментальный образец двухрядного прицепного ротационного картофелекопателя, общая схема которого, в агрегате с трактором МТЗ-80, представлена на рисунке 45.

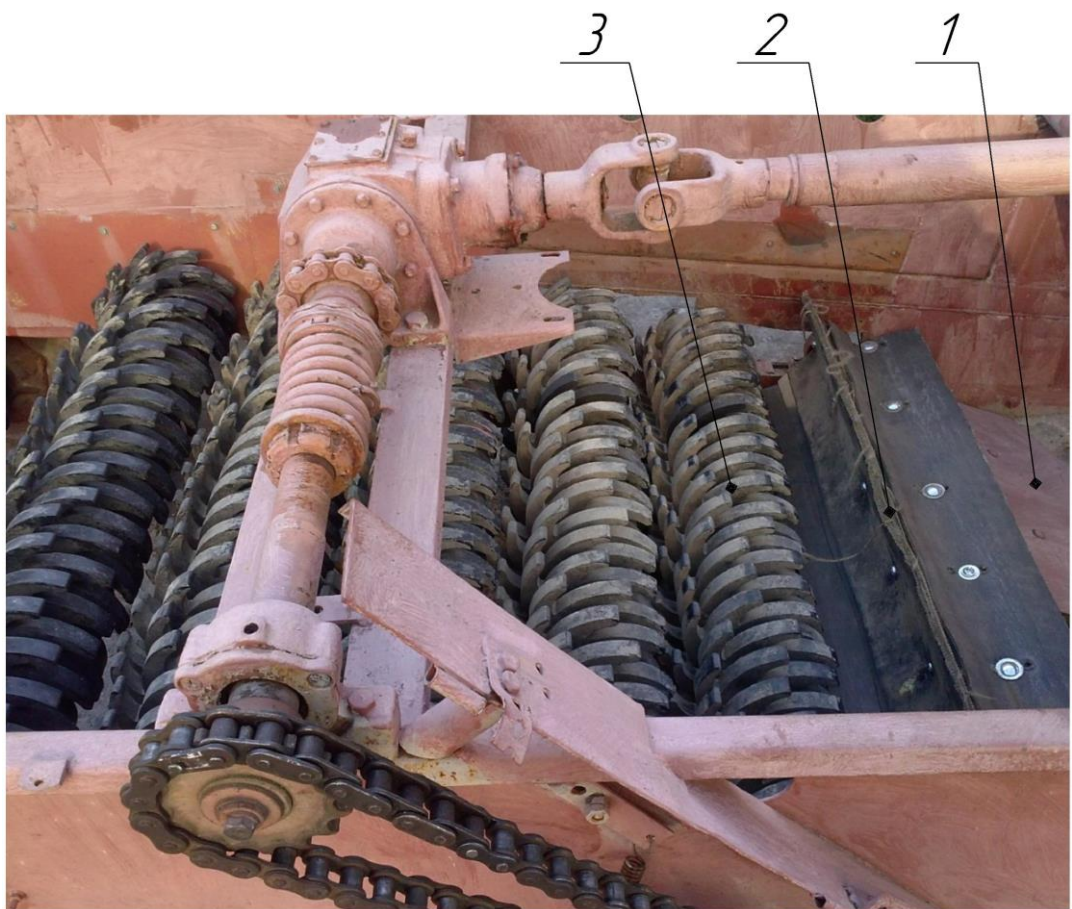


1 – лемех, 2 – приемно-подающий бiter, 3 - ротационный сепаратор, 4 - угловой редуктор, 5 - промежуточный вал, 6 - цепная передача, 7 - карданный вал, 8 - прицепное устройство к трактору, 9 - опорные колеса, 10 - рама

Рисунок 45 - Схема экспериментальной установки

Картофелекопатель ротационного типа для уборки картофеля содержит подкапывающие лемеха 1, приемный бiter 2, ротационный сепаратор 3, угловой редуктор 4, промежуточный вал 5, цепную передачу 6, карданный вал 7, прицепное устройство к трактору 8, опорные колеса 9, установленные на общей раме 10. В конструкции картофелекопателя бiter 2 и валы сепаратора 3 установлены на раме 10 параллельно между собой и совместно под углом 90° к направлению движения копателя. Лемеха 1 выполнены в виде плоских пластин конусообразной формы (рисунок 47).

Приемный битер 2 установлен между лемехами 1 и первой секцией сепаратора 3 (рисунок 46). Битер состоит из профиля квадратного сечения, уголков и кронштейнов, на которых совместно закреплены пластины, резиноканевые лопасти и отражающие щитки. В кронштейнах вырезаны пазы для крепления и радиального смещения пластин, лопастей и щитков, что позволяет изменять рабочую высоту лопастей от 150 до 220 мм.



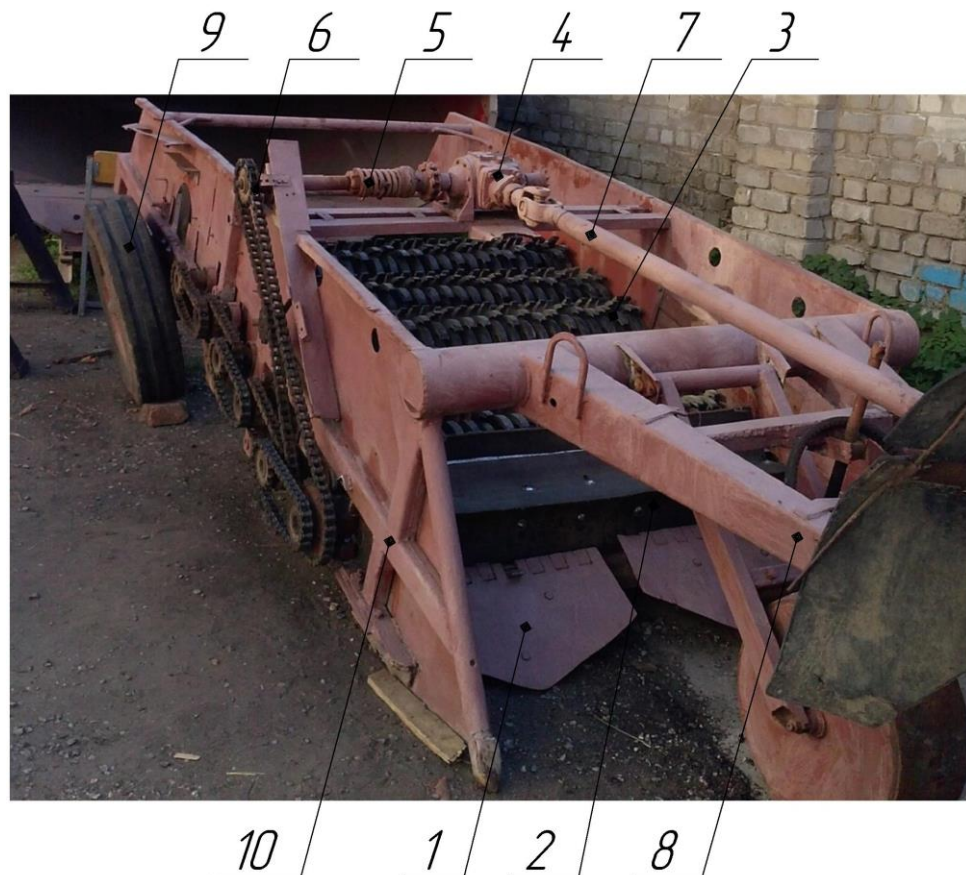
1 – лемех, 2 - приемный битер, 3 - ротационный сепаратор

Рисунок 46 – Лемех, приемный битер и
ротационный сепаратор

Сепаратор 3 образован пятью ротационными секциями, которые установлены на раме картофелекопателя 10 (в подшипниковых опорах) параллельно битеру. Рабочие органы секций установлены с зазором S , т.е. без перекрытия выступов соседних рядов, за счет чего исключается вероятность их

зацепления при вращении или смещении роторов вдоль валов. Секции и битер вращаются посредством цепного привода от углового трехступенчатого редуктора 4 и карданного вала 7, соединенного с валом отбора мощности трактора (рисунок 47).

Ротационные секции включают в себя роторы и распорно-регулировочные втулки, посредством которых первые смещаются вдоль валов и между ними устанавливается сепарирующий зазор C от 30 до 50 мм.



1 – лемех, 2 – приемно-подающий битер, 3 - ротационный сепаратор, 4 - угловой редуктор, 5 - промежуточный вал, 6 - цепная передача, 7 - карданный вал, 8 - прицепное устройство к трактору, 9 - опорные колеса, 10 - рама

Рисунок 47 – Общий вид экспериментальной установки

Для определения средней скорости движения V_k рабочего агрегата, состоящего из трактора МТЗ-80 и ротационного картофелекопателя, измеряли длину загонки и время ее прохождения в рабочем режиме. Частоту вращения

лопастного битера и ротационных рабочих органов определяли стандартным тахометром ТЧ-10-Р (рисунок 48).



Рисунок 48 – Измерение частоты вращения ротационных рабочих органов n_p и битера n_b

Исследования по определению устойчивости перемещения картофельного пласта и его компонентов основными рабочими органами ротационного картофелекопателя фиксировались методом цифровой видео и фотосъемки. Затем, на основе анализа полученных видео и фотоматериалов, провели исследования рабочих процессов битера и ротационного сепаратора. В зависимости от полученных результатов делали выводы о работоспособности и эффективности сепаратора, а также об адекватности данных полученных теоретическим путем. В тоже время, на основании оценки показателей эффективности, энергоемкости и повреждения клубней, провели уточнение рабочих параметров лопастного битера и ротационных рабочих органов.

Для проведения опытов, снятия параметров и фиксации технологических процессов были использованы следующие агрегаты, оборудование и приборы:

- трактор МТЗ-80;

- прицеп 2ПТС-4;
- видеокамера Canon FS11;
- фотоаппарат Canon Power Shot A1100 IS;
- калькулятор Cittyzen SRP-145;
- штангельциркуль;
- секундомер;
- персональный компьютер AMD «Athlon 5600+»;
- весы МК–15,2–ТН-21;
- тахометр ТЧ-10-Р;
- расходомер DFM 100АК;
- складной метр ТУ 3936-034-00220836-98;
- комплект сменных звездочек для цепных передач.

4. Результаты экспериментальных исследований в производственно-полевых условиях

4.1 Результаты исследований устойчивости перемещения картофельного пласта и сепарирующей способности лопастного битера и ротационного сепаратора

В начале экспериментальных исследований ротационного картофелекопателя в производственно-полевых условиях были проведены опыты по определению режимов работы лопастного битера и ротационного сепаратора. Исследование работы битера, согласно методике, выполнили путем анализа фотоснимков на предмет равномерного приёма, разрушения структуры и устойчивой подачи подкопанного пласта на вершины рабочих органов первой секции. Ротационный сепаратор, таким же образом, исследовали на предмет распределения по ширине рабочей поверхности и перемещения компонентов пласта без сгуживания и без перебрасывания через рабочие секции. Сепарирующую способность ротационного картофелекопателя, согласно методике, оценивали на основе анализа фотоснимков на предмет сброса с последней секции сепаратора просеиваемых почвенных примесей, которые должны были выделяться рабочими органами, а также путем сбора потерь клубней под слоем отсепарированной почвы.

Опыты проводились согласно методике экспериментальных исследований приведённой в разделе 3.2.

На первом этапе данных исследований скорость движения ротационного картофелекопателя V_k устанавливали равной 1,1; 1,4; 1,7 м/с. При установке частоты вращения лопастного битера n_b и роторов n_p соответственно 270 мин^{-1} и 200 мин^{-1} наблюдалось сгуживание подкопанного пласта перед первым рядом ротационных рабочих органов. В зоне интенсивной сепарации, вследствие значительной скорости подачи и небольшой частоты вращения роторов,

компоненты картофельного пласта перемещались со сгруживанием во впадинах между рабочими секциями. Из-за чего значительно сократилось количество почвенных примесей, просеивающихся в сепарирующие просветы. Это, в свою очередь, привело к увеличению количества не разрушенных почвенных комков в зоне окончательной очистки и в сходе с последней секции ротационного сепаратора (рисунок 49).



Рисунок 49 – Фотоснимок перемещения картофельного пласта со сгруживанием и снижением сепарирующей способности

На втором этапе данных экспериментальных исследований скорость движения ротационного картофелекопателя V_k также устанавливали равной 1,1; 1,4; 1,7 м/с. Режим вращения битера и роторов установили по средним значениям, для битера n_b - 300 мин⁻¹ и роторов n_p - 230 мин⁻¹. В ходе опытов определили, что с увеличением частоты вращения повысилась и устойчивость перемещения картофельного пласта на всех рабочих органах ротационного картофелекопателя. Лопастной битер равномерно принимал, предварительно разрушал структуру и

устойчиво подавал пласт на вершины первого ряда рабочих органов ротационного сепаратора. Анализ фотоснимков показал, что сепаратор интенсивно распределял картофельный пласт по всей своей ширине, перемещал его компоненты без сгуживания и эффективно просеивал почвенные примеси, обеспечивая картофелекопателю высокую сепарирующую способность. При этом клубни и не разрушенные комки перемещались в зоне окончательной очистки с минимальным отрывом от поверхностей роторов и без перебрасывания через рабочие секции (рисунок 50).



Рисунок 50 – Фотоснимок устойчивого перемещения компонентов картофельного пласта и высокой сепарирующей способности

На третьем этапе исследований скорость движения ротационного картофелекопателя V_k устанавливали аналогично первым двум этапам 1,1; 1,4; 1,7 м/с. При установке частоты вращения лопастного битера $n_b=330 \text{ мин}^{-1}$ и роторов $n_p=260 \text{ мин}^{-1}$ наблюдалось чрезмерное динамическое воздействие лопастного битера на подкопанный пласт, что приводило к существенному росту степени

разрушения его структуры и перебрасыванию через первую секцию сепаратора. Ротационные рабочие органы также оказывали значительное динамическое воздействие на компоненты картофельного пласта, что привело к снижению количества почвенных примесей переходящих из зоны интенсивной сепарации в зону окончательной очистки. Поэтому в зоне окончательной очистки наблюдалось перемещение клубней и не разрушенных почвенных комков со значительным отрывом от роторов (рисунок 51).



Рисунок 51 – Фотоснимок перемещения компонентов картофельного пласта со значительным отрывом от ротационных рабочих органов

Максимальные потери клубней (до 8%) наблюдались при перемещении картофельного пласта со сгруживанием при $n_p=200 \text{ мин}^{-1}$. С увеличением частоты вращения роторов возросла и сепарирующая способность ротационной рабочей поверхности, вследствие чего при $n_p=230...260 \text{ мин}^{-1}$ общие потери картофеля не превышали 5%.

В результате первого этапа экспериментальных исследований были определены эффективные режимы работы, обеспечивающие устойчивость транспортирования картофельного пласта лопастным битером и ротационным сепаратором, а также высокую сепарирующую способность картофелекопателя. Так, при скорости движения ротационного картофелекопателя V_k равной 1,1; 1,4; 1,7 м/с и частоте вращения лопастного битера $n_b=300 \text{ мин}^{-1}$ происходил устойчивый прием с лемехов подкопанного картофельного пласта и обеспечивалось предварительное разрушение его структуры. Также битер устойчиво подавал пласт на вершины первого ряда рабочих органов сепарирующей поверхности. При частоте вращения роторов $n_p=230 \text{ мин}^{-1}$ происходило окончательное распределение компонентов картофельного пласта по ширине сепаратора и их устойчивое перемещение с минимальным отрывом от поверхностей роторов, исключая перебрасывание через рабочие секции. В итоге установили, что экспериментально определенные режимы вращения битера $n_b=300 \text{ мин}^{-1}$ и роторов $n_p=230 \text{ мин}^{-1}$ обеспечивают наибольшую сепарирующую способность при безотрывном и устойчивом перемещении пласта, что подтверждает теоретические предпосылки по исследованию их рабочих процессов.

4.2 Анализ результатов экспериментальных исследований по определению режимов работы ротационного картофелекопателя

В соответствии с программой и методикой экспериментальных исследований в полевых условиях нами были проведены опыты по определению рациональных кинематических параметров ротационного картофелекопателя (рисунок 52).

Эксперименты были реализованы по схеме композиционного плана второго порядка для трех факторов. В качестве критерия оптимальности, для данного плана, была принята ортогональность, которая является одним из наиболее важных свойств матрицы. Свойство ортогональности заключается в том, что

сумма построчных произведений элементов любых двух столбцов равна нулю. Ортогональность матрицы позволила оценить все коэффициенты уравнения регрессии независимо друг от друга. Матрица планирования факторного эксперимента представлена в разделе 3.5 диссертационной работы.



Рисунок 52 – Фрагмент проведения опытов по определению полноты сепарации примесей S_c ротационным картофелекопателем

Проведение опытов методом ПФЭ позволило определить зависимость полноты сепарации примесей ротационным картофелекопателем S_c от скорости его движения V_k , а также от значений частоты вращения приемно-подающего битера n_b и ротационных рабочих органов n_r . Сочетания данных факторов были определены в процессе планирования экспериментальных исследований и представлены в матрице планирования эксперимента (таблица 5).

На основании плана эксперимента были проведены опыты и получены значения критерия оптимизации. В результате была заполнена таблица параметров и результатов проведения экспериментов (таблица 7).

Таблица 7 - Параметры и результаты проведения экспериментов

Номер опыта	$V_k, м / с$	$n_6, мин^{-1}$	$n_p, мин^{-1}$	$y, \%$
1	1,7	330	260	72,2
2	1,1	330	260	84,7
3	1,7	270	260	75,5
4	1,1	270	260	78,6
5	1,7	330	200	71,2
6	1,1	330	200	78,3
7	1,7	270	200	72,4
8	1,1	270	200	74,5
9	2	300	230	73,8
10	0,9	300	230	86,5
11	1,4	400	230	82,4
12	1,4	220	230	80,6
13	1,4	300	315	88,5
14	1,4	300	165	78,5
15	1,4	300	230	89,7

Подставляя полученные значения полноты сепарации S_c в уравнения (90), (91) определили свободный член и коэффициенты регрессии. Таким образом, полином второй степени (88) имеет вид:

$$y = 88,3 - 3,7x_1 + 0,7x_2 + 2,4x_3 - 5,2x_1^2 - 4,3x_2^2 - 2,9x_3^2 - 1,8x_1x_2 - 0,8x_1x_3 + 0,03x_2x_3 \quad (92)$$

Данное уравнение описывает зависимость полноты сепарации примесей S_c от управляемых факторов: x_1 – скорости движения ротационного картофелекопателя, x_2 – частоты вращения приемно-подающего бitera, x_3 – частоты вращения ротационных рабочих органов.

Для принятия модели к исследованию проверили ее адекватность с помощью критерия Фишера. Для этого вычислили дисперсию адекватности S_{ad}^2 :

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N - (k + 1)} \sum_{i=1}^n (y - \bar{y}_j)^2, \quad (93)$$

где $y - \bar{y}_j$ - разница между полученным и рассчитанным значением параметра оптимизации.

Дисперсия адекватности S_{ad}^2 составила 2,05. Критерий Фишера определили по формуле:

$$F_P = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F_T, \quad (94)$$

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

S_y^2 - дисперсия воспроизводимости эксперимента.

Дисперсия воспроизводимости эксперимента S_y^2 была вычислена на основании первых трех опытов в центре плана, $S_y^2 = 2,2$.

$$F_P = \frac{2,05}{2,2} = 0,93$$

Так как $F_P < F_T$ то, следовательно, делаем вывод об адекватности полученной модели (92).

Значимость коэффициентов регрессии проверили с помощью общепринятой методики [96]. Для этого рассчитали дисперсии коэффициентов регрессии:

$$s^2 \{b_i\} = \frac{S_y^2}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2} \quad (95)$$

Доверительные интервалы для коэффициентов регрессии определили из формул:

$$\begin{aligned}
\Delta b_0 &= \pm t_T s\{b_0\}; \\
\Delta b_i &= \pm t_T s\{b_i\}; \\
\Delta b_{il} &= \pm t_T s\{b_{il}\}; \\
\Delta b_{ii} &= \pm t_T s\{b_{ii}\},
\end{aligned}
\tag{96}$$

где t_T - t -критерий Стьюдента. Величина данного критерия зависит от принятого доверительного уровня вероятности (уровня значимости) α и числа степеней свободы f , с которыми определялась дисперсия S_y^2 . Согласно [96] для данной модели эксперимента число степеней свободы $f=2$. При доверительном уровне вероятности, принятом равным $\alpha=5\%$ и числе степеней свободы $f=2$, t -критерий Стьюдента $t_T=4,3$ [96].

Значения коэффициентов уравнения регрессии и их доверительных интервалов представлены в таблице 8.

Таблица 8 - 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}
$/\Delta b_0$	$/\Delta b_1$	$/\Delta b_2$	$/\Delta b_3$	$/\Delta b_{12}$	$/\Delta b_{13}$	$/\Delta b_{23}$	$/\Delta b_{11}$	$/\Delta b_{22}$	$/\Delta b_{33}$
88,3	-3,7	0,7	2,4	-1,8	-0,8	0,03	-5,2	-4,3	-2,9
/1,64	/1,93	/1,93	/1,93	/2,25	/2,25	/2,25	/2,75	/2,75	/2,75

Поскольку $|\Delta b_2| > |b_2|$, $|\Delta b_{12}| > |b_{12}|$, $|\Delta b_{13}| > |b_{13}|$, $|\Delta b_{23}| > |b_{23}|$, то эти коэффициенты были признаны незначимыми при 5%-ом уровне значимости и их можно исключить из уравнения регрессии.

Исходя из этого, уравнение, описывающее зависимость полноты сепарации примесей S_c от управляемых факторов, примет вид:

$$y = 88,3 - 3,7x_1 + 2,4x_3 - 5,2x_1^2 - 4,3x_2^2 - 2,9x_3^2 \tag{97}$$

Уравнение (97) представлено в кодированной форме и его необходимо привести к натуральному виду. Для этого переменные x_1, x_2, x_3 преобразовали с помощью выражения (85), а затем подставили в уравнение (97). Окончательная интерполяционная формула для предсказания значений полноты сепарации S_c будет иметь вид:

$$y = 149,4V_k + 2,86n_{\delta} + 1,45n_p - 57,7V_k^2 - 0,005n_{\delta}^2 - 0,003n_p^2 - 626,5 \quad (98)$$

Для определения экстремума функции $y=f(V_k, n_{\delta}, n_p)$ рассчитали координаты стационарной точки для основных факторов. Согласно [1,8,25,65] в процессе работы битер в основном разрушает структуру и подает картофельный пласт на следующие рабочие органы. В зазор между его лопастями и основным сепарирующим устройством просеивается лишь небольшое количество примесей. Исходя из этого, частота вращения битера n_{δ} оказывает минимальное влияние на полноту сепарации S_c , поэтому ее значение было принято в соответствии с нулевым уровнем, т.е. 300 мин^{-1} .

Продифференцировав уравнение (98) по скорости движения картофелекопателя V_k и по частоте вращения роторов n_p , а затем приравняв частные производные нулю, получили систему уравнений:

$$\begin{cases} 149,4 - 115,4V_k = 0 \\ 1,45 - 0,006n_p = 0 \end{cases} \quad (99)$$

В результате решения системы уравнений (99) получили координаты стационарной точки: $V_k=1,3 \text{ м/с}$; $n_p=242 \text{ мин}^{-1}$.

Для более подробного изучения интерполяционной формулы (98), предсказывающей полноту сепарации примесей ротационным картофелекопателем S_c , составили уравнения регрессии для каждой пары взаимодействующих факторов, принимая величину третьего фактора по нулевому уровню.

$$\text{I. } V_k, n_{\delta}: \quad S_c = 149,4V_k + 2,86n_{\delta} - 57,7V_k^2 - 0,005n_{\delta}^2 - 451,7 \quad (100)$$

$$\text{II. } V_k, n_p: \quad S_c = 149,4V_k + 1,45n_p - 57,7V_k^2 - 0,003n_p^2 - 218,5 \quad (101)$$

$$\text{III. } n_{\delta}, n_p: \quad S_c = 2,86n_{\delta} + 1,45n_p - 0,005n_{\delta}^2 - 0,003n_p^2 - 530,43 \quad (102)$$

На основе уравнений (100), (101), (102) построили графики зависимостей, описывающих расположение области оптимальных значений полноты сепарации примесей ротационным картофелекопателем S_c на поверхностях отклика (рисунки 53, 54, 55).

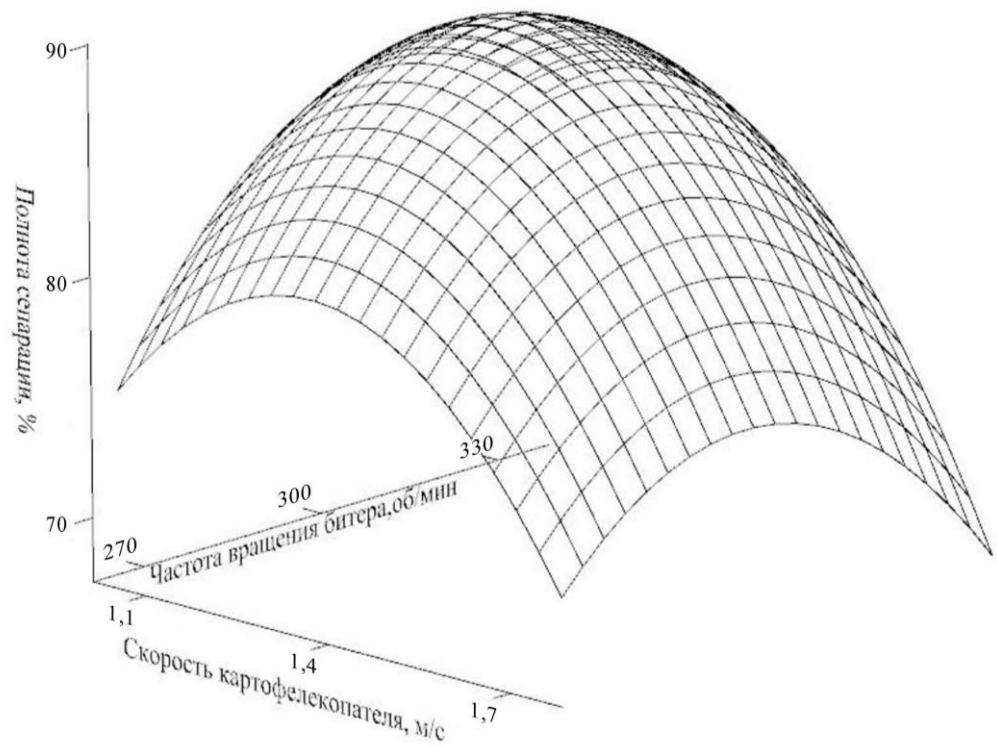


Рисунок 53 – Поверхность отклика и ее контурный график, характеризующие полноту сепарации S_c при изменении V_k , n_b и при постоянном значении фактора n_p

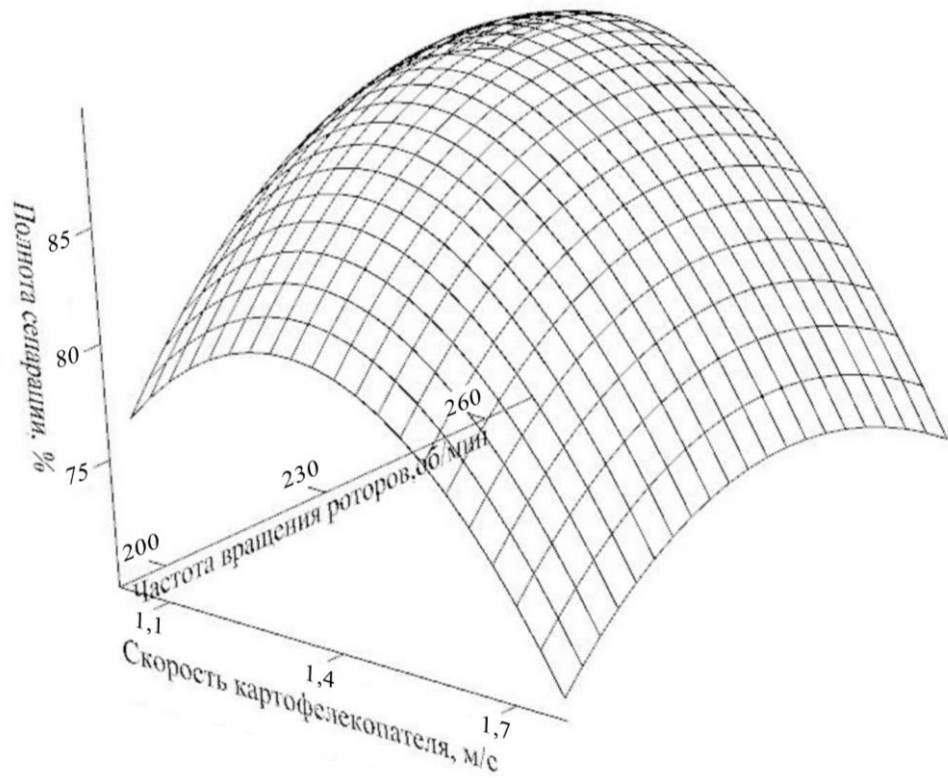


Рисунок 54 – Поверхность отклика и ее контурный график, характеризующие полноту сепарации S_c при изменении V_k , n_p и при постоянном значении фактора n_o

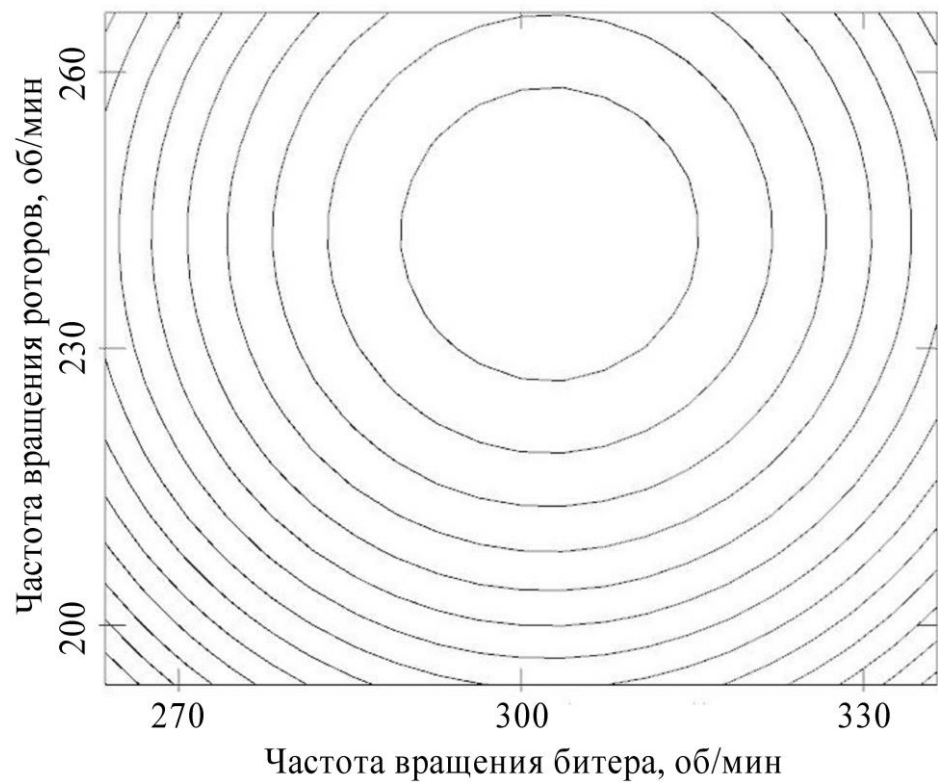
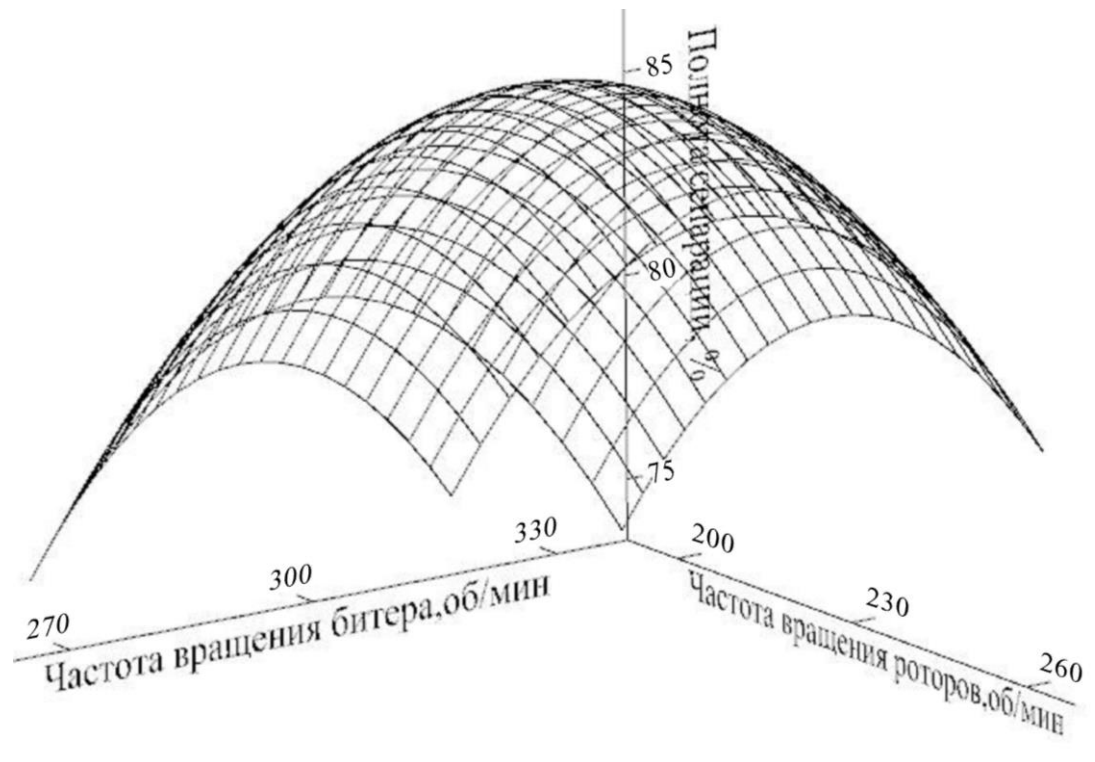


Рисунок 55 – Поверхность отклика и ее контурный график, характеризующие полноту сепарации S_c при изменении n_{δ} , n_p и при постоянном значении фактора V_k

На основе анализа полученных уравнений (100), (101), (102) и координат стационарной точки установили, что оптимальное значение скорости движения ротационного картофелекопателя V_k находится ниже нулевого уровня и составляет 1,3 м/с. С повышением V_k до 1,7 м/с увеличивалась и подача картофельной массы на рабочую поверхность, вследствие чего полнота сепарации почвы S_c снижалась. Опыты проводились в сложных почвенно-климатических условиях (влажность суглинистой почвы составляла 9,3...12,8%), из-за чего в почвенном слое присутствовало большое количество не разрушенных комков. При работе на серых лесных и легких суглинистых почвах, с влажностью от 12% до 23%, скорость работы ротационного картофелекопателя может достигать 1,6...1,7 м/с, с обеспечением высокой сепарирующей эффективности.

В тоже время опыты показали, что диапазон рациональных значений частоты вращения ротационных рабочих органов n_p располагается выше нулевого уровня. В ходе опытов максимальная полнота сепарации S_c достигалась при $n_p=242 \text{ мин}^{-1}$. При данном значении перемещение картофельного пласта происходило устойчиво, т.е. без сгруживания и без перебрасывания через рабочие секции. Это объясняется наличием в почвенном слое большого количества не разрушенных комков, т.к. для их подбрасывания необходимо приложить значительные усилия. Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что рациональные значения частоты вращения ротационных рабочих органов, для различных типов почв, находятся в пределах от 230 до 250 мин^{-1} .

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что диапазон рациональных значений частоты вращения битера n_b находится в пределах от 300 до 330 мин^{-1} . Данные значения практически полностью соответствуют величинам, полученным в ходе теоретических исследований (пункт 2.4).

В ходе опытов также контролировалось количество растительных примесей, наматывающихся на ротационные рабочие органы и распорные втулки.

Большой внешний диаметр и высокая окружная скорость ротационных рабочих органов препятствовали наматыванию на них растительных остатков.

Однако частичному наматыванию были подвержены распорные втулки третьей и четвертой секций, расположенные в центре сепарирующей поверхности. Максимальная высота слоя растительных остатков на распорных втулках составляла 1...1,5 см. После чего увеличившийся внешний диаметр и повысившаяся окружная скорость препятствовали наматыванию на них новых слоев. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что предложенная конструкция ротационной рабочей поверхности обеспечивает удаление растительных остатков без использования дополнительных устройств.

В результате данных исследований были подтверждены теоретические предпосылки о перспективности совмещения в конструкции нового ротационного картофелекопателя лопастного битера и ротационного сепаратора. Также были определены их рациональные режимы работы, при которых полнота сепарации примесей ротационным картофелекопателем S_c составляет 89,7%. Так полученные уравнения регрессии, поверхности отклика и контурные графики, характеризующие зависимость полноты сепарации примесей ротационным картофелекопателем S_c от всех сочетаний основных факторов, показали, что ее максимальное значение (89,7%) достигается при скорости работы ротационного картофелекопателя $V_k=1,1...1,4$ м/с, при значениях частоты вращения лопастного битера $n_b=300...330$ мин⁻¹ и роторов $n_p=230...250$ мин⁻¹.

4.3 Анализ результатов опытов по определению основных эксплуатационных характеристик ротационного картофелекопателя

Экспериментальные исследования по определению основных эксплуатационных характеристик ротационного картофелекопателя проводились согласно методике приведенной в разделе 3.4.

На первом этапе данных экспериментальных исследований была определена производительность ротационного картофелекопателя за 1 час эксплуатационного времени $W_{эк}$, га/ч. При установленном коэффициенте использования эксплуатационного времени ротационного картофелекопателя $K_{эк}$ равном 0,86,

общем объеме произведенных работ 13,5 га и средней скорости работы 1,5 м/с производительность за 1 час эксплуатационного времени $W_{эк}$ составила 0,607 га/ч.

На втором этапе опытов был определен удельный расход топлива трактором МТЗ-80 при его работе в комплексе с экспериментальным ротационным картофелекопателем. Измерения, проводимые посредством расходомера DFM 100AK, показали, что при общем объеме выполненных работ 13,5 га удельный расход топлива составил 11,9 кг/ч.

Зависимость повреждаемости картофеля от режимов работы ротационного картофелекопателя определяли поэтапно. Сначала провели опыты при скорости движения картофелекопателя $V_k=1,1$ м/с. Травмирование клубней, в данном случае, напрямую зависело от частоты вращения ротационных рабочих органов n_p . Повышение ее значений, соответственно, приводило и к росту повреждаемости картофеля $П_k$ от 1,4% до 2,7% (рисунок 56). Причем, чем выше устанавливали частоту вращения ротационных рабочих органов n_p , тем быстрее увеличивалось количество травмированных клубней. Это связано с небольшим количеством материала перемещаемого по ротационной рабочей поверхности. При скорости работы картофелекопателя $V_k=1,1$ м/с основная почвенная прослойка, защищающая клубни, просеивалась уже на третьей секции. Вследствие чего при $n_p=200...230$ мин⁻¹ компоненты картофельного пласта равномерно распределялись по ширине сепаратора, а также перемещались без сгуживания во впадинах между ротационными секциями и с минимальным отрывом от поверхностей рабочих органов. За счет этого повреждаемость картофеля составляла 1,4...1,6%. При $n_p=230...260$ мин⁻¹ клубни начинали перемещаться с небольшим отрывом, что приводило к увеличению количества и силы их соударений между собой, с не разрушенными почвенными комками и поверхностями ротационных рабочих органов. Вследствие чего повреждаемость картофеля, соответственно, выросла до 1,6...2,7% (рисунок 56).

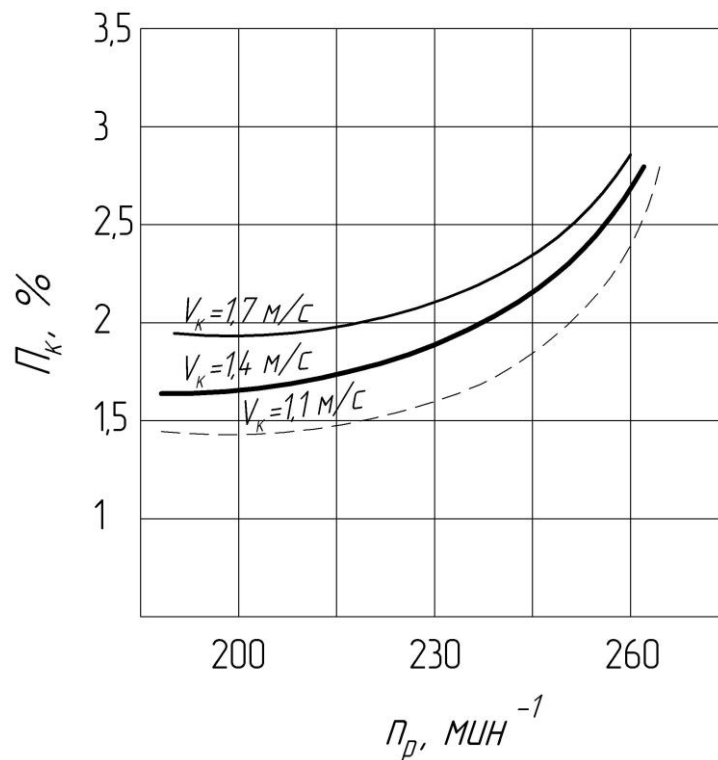


Рисунок 56 - Графические зависимости повреждения картофеля Π_k от частоты вращения роторных рабочих органов n_p при различной скорости картофелекопателя V_k

Лопастной битей оказывал минимальное влияние на степень травмирования клубней Π_k , т.к. их взаимодействие происходило через значительную почвенную прослойку, которая включала в себя наиболее уплотненные слои нижней части подкопанного пласта. Частоту его вращения устанавливали по результатам полнофакторного эксперимента $n_6 = 300 \dots 330 \text{ мин}^{-1}$ и в соответствии со скоростью движения картофелекопателя V_k (таблица 3).

При $V_k = 1,4 \text{ м/с}$ распределение повреждаемости картофеля Π_k по всему диапазону значений частоты вращения роторных рабочих органов n_p наблюдалось более равномерно. В данном случае при частоте вращения роторов n_p от 200 мин^{-1} до 260 мин^{-1} компоненты картофельного пласта перемещались по всей длине роторной рабочей поверхности устойчиво, а подбрасывание клубней на четвертой и пятой секциях не превышало значений определенных теоретически (пункт 2.6). Исходя из этого, повреждаемость картофеля Π_k

увеличивалась прямо пропорционально увеличению частоты вращения роторов n_p . Ее значения составили от 1,6% до 2,7%.

В ходе опытов, проведенных при скорости работы ротационного картофелекопателя $V_k=1,7$ м/с, наблюдалась наибольшая величина подачи картофельного пласта в единицу времени. Вследствие чего при частоте вращения роторов n_p от 200 до 230 мин^{-1} между первой и второй секцией сепаратора происходило небольшое сгуживание картофелесодержащего пласта. Это приводило к росту количества соударений выступов роторов с клубнями и комками, за счет чего повреждаемость клубней Π_k увеличилась до 1,8...2,2%. Однако с повышением n_p до 230...260 мин^{-1} процесс перемещения компонентов картофельного пласта становился более устойчивым, а повреждаемость картофеля Π_k увеличивалась с меньшей интенсивностью и составила 2,3...2,7%.

Как показали опыты, даже в самом неблагоприятном случае повреждаемость не превышала 2,7%, что допускается агротехническими требованиями к сепарирующим устройствам и картофелеуборочным машинам в целом (рисунок 56).

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод о том, что при скорости работы ротационного картофелекопателя $V_k=1,1...1,3$ м/с оптимальная частота вращения ротационных рабочих органов n_p составляет 200...230 мин^{-1} , а при наиболее производительном диапазоне $V_k=1,3...1,7$ м/с их частота вращения должна находиться в пределах от 230...260 мин^{-1} .

4.4 Выводы

1. В результате первого этапа экспериментальных исследований установили, что при скорости работы ротационного картофелекопателя $V_k=1,1; 1,3; 1,7$ м/с обеспечивается устойчивое перемещение пласта лопастным битером и высокая сепарирующая способность ротационного сепаратора при режиме вращения битера $n_b=300$ мин^{-1} и роторов $n_p=230$ мин^{-1} .

2. По результатам полнофакторного эксперимента составлена интерполяционная формула, выведены уравнения регрессии, построены поверхности отклика и контурные графики, характеризующие зависимость полноты сепарации примесей ротационным картофелекопателем S_c от всех сочетаний основных факторов.

3. На основании уравнений регрессии, поверхностей отклика и контурных графиков определили рациональные диапазоны скорости работы картофелекопателя $V_k=1,1 \dots 1,4$ м/с; частоты вращения битера $n_b=300 \dots 330$ мин⁻¹ и частоты вращения ротационных рабочих органов $n_p=230 \dots 250$ мин⁻¹, обеспечивающие максимальные значения полноты сепарации примесей $S_c=89,7\%$.

4. В результате эксплуатационных опытов получены значения производительности ротационного картофелекопателя за 1 час эксплуатационного времени $W_{эк} - 0,607$ га/ч и удельного расхода топлива трактором МТЗ-80 - 11,9 кг/ч, повреждения клубней составили 1,4...2,7%.

5. Техничко-экономическая оценка применения картофелекопателя ротационного типа

5.1 Расчет экономической эффективности предложенного технического решения

Согласно [37,59] повышение эффективности производства и снижение себестоимости картофеля в значительной степени зависит от технологии и оборудования, применяемого для его уборки. Так повышение эффективности производства картофеля в России и в Калужской области в частности сдерживается недостатком эффективных, недорогих в эксплуатации и менее энергоемких картофелеуборочных машин, которые можно использовать в различных почвенно-климатических и хозяйственных условиях. Поэтому разработанный образец ротационного картофелекопателя должен обеспечить повышение качественных и экономических показателей работы в условиях НЗ РФ.

Расчёт технико-экономической эффективности применения картофелекопателя ротационного типа провели по стандартной методике [61,62] согласно ГОСТ Р 52778-2007 и ГОСТ 23729-88. Для этого использовались исходные технико-экономические данные актуальные на 2018 год, приведенные в таблице 9.

Экономическую эффективность от применения ротационного картофелекопателя определили в результате сравнения его эксплуатационных затрат с эксплуатационными затратами серийного картофелекопателя КСТ-1,4А.

Для того чтобы определить амортизационные отчисления на эксплуатацию картофелеуборочных машин $Z_{ам}$, для каждого варианта рассчитали техническую производительность W_q [62]:

$$W_q = 0,1B_p V_p \tau, \quad (103)$$

где B_p - ширина захвата машины, м;

V_p - рабочая скорость агрегата, км/ч;

τ - коэффициент использования времени смены.

Балансовую стоимость серийной машины B_c определили по формуле [62]:

$$B_c = \Pi k_n, \quad (104)$$

где Π - оптовая цена машины, руб.;

k_n - коэффициент, учитывающий издержки на доставку машины в хозяйство при покупке, $k_n = 1,2$ [62].

Балансовую стоимость ротационного картофелекопателя B_p рассчитали на основе стоимости серийной машины:

$$B_p = B_c - \Pi_{эл} + \Pi_{рс}, \quad (105)$$

где $\Pi_{эл}$ - оптовая цена основного и каскадного элеваторов, руб.;

$\Pi_{рс}$ - стоимость замены основного и каскадного элеваторов на ротационную сепарирующую поверхность и приемно-подающий битер, руб.

Стоимость замены основного и каскадного элеваторов на ротационную сепарирующую поверхность и приемно-подающий битер $\Pi_{рс}$ включает в себя:

- затраты на покупку основных материалов Π_m ;
- стоимость покупных изделий и комплектующих $\Pi_{нк}$;
- транспортно-заготовительные расходы $\Pi_{тзр}$;
- возвратные отходы $\Pi_{во}$;
- основную заработную плату производственным рабочим $\Pi_{озп}$.

$$\Pi_{рс} = \Pi_m + \Pi_{нк} + \Pi_{тзр} - \Pi_{во} + \Pi_{озп} \quad (106)$$

Амортизационные отчисления на эксплуатацию $З_{ам}$ определяли по формуле [62]:

$$З_{ам} = \frac{B_i H_d}{100 T_{год} W_q}, \quad (107)$$

где H_d - норма амортизационных отчислений, %;

i - вариант картофелекопателя;

$T_{год}$ - годовая загрузка машины, ч.

Таблица 9 - Исходные данные для технико-экономической оценки эффективности применения картофелекопателя ротационного типа

№	Наименование показателей	Единицы измерения	Источник	Картофелекопатель КСТ-1,4А	Ротационный картофелекопатель
1	2	3	4	5	6
1	Марка трактора, с которым агрегируется картофелекопатель	-	Техническое описание	МТЗ-80	МТЗ-80
2	Цена картофелекопателя	руб.	Прейскурант	231 000	-
3	Нормативная годовая загрузка картофелекопателя	ч	НСМ для экономической оценки с/х техники	200	200
4	Количество обслуживающего персонала	чел.	Техническое описание	1	1
5	Сумма часовой оплаты с учетом всех видов доплат трактористам V разряда	руб./ч	НСМ	95,6	95,6
6	Сумма часовой оплаты с учётом всех видов доплат рабочим на подборе	руб./ч	НСМ	75,5	75,5
7	Урожайность картофеля	т/га	Протокол испытаний	17,5	17,5
8	Норма амортизационных отчислений на картофелекопатель	%	НСМ	12,5	12,5
9	Норма отчислений на ремонт и техническое обслуживание картофелекопателя	%	НСМ	7,0	7,0
10	Расход ГСМ	кг/ч	Протокол испытаний	12,3	11,9

1	2	3	4	5	6
11	Комплексная цена 1 кг ГСМ	руб.	НСМ	46,5	46,5
12	Срок службы картофелекопателя	лет	НСМ	8	8
13	Рабочая скорость	км/ч	Протокол испытаний	4,32	5,04
14	Ширина захвата	м	Техническое описание	1,4	1,4
15	Площадь места для хранения картофелекопателя	м ²	Техническое описание	10,4	10,4
16	Удельная стоимость 1 м ² машиноместа	руб./м ²	НСМ	170	170
17	Норматив отчислений на амортизацию и ремонт мест хранения техники	%	НСМ	8,0	8,0
18	Годовой объем работ, выполненных картофелекопателем	га	Протокол испытаний	13,5	13,5
19	Коэффициент использования времени смены	-	Протокол испытаний	0,8	0,86

Затраты на техническое обслуживание и ремонт рассчитали по формуле:

$$З_{то} = \frac{B_i H_{то}}{100 T_{год} W_q}, \quad (108)$$

где $H_{то}$ - норматив затрат на техническое обслуживание и ремонт, %.

Затраты на горюче-смазочные материалы [62]:

$$З_{гсм} = \frac{H_{гсм} Ц_{гсм}}{W_q}, \quad (109)$$

где $H_{гсм}$ - норма расхода горюче-смазочных материалов, кг/ч;

$Ц_{гсм}$ - комплексная цена горюче-смазочных материалов, руб./кг.

Затраты на хранение находятся по формуле [62]:

$$З_{xp} = \frac{H_{xp}}{T_{год} W_{\text{ч}}}, \quad (110)$$

где H_{xp} - норматив затрат на хранение одного агрегата, руб.

Норматив затрат на хранение одного агрегата H_{xp} определили из выражения [62]:

$$H_{xp} = \frac{S_{\kappa} K_{xp} H_{xp}^d}{100}, \quad (111)$$

где S_{κ} - площадь, занимаемая машиной, м^2 ;

K_{xp} - удельная стоимость 1 м^2 машиноместа, руб./ м^2 ;

H_{xp}^d - норматив затрат на амортизацию и ремонт мест хранения техники, %.

Величину оплаты труда механизаторов рассчитали по формуле [62]:

$$З_{\text{мех}} = \frac{C_{\text{тар}} L}{W_{\text{ч}}}, \quad (112)$$

где $C_{\text{тар}}$ - тарифная ставка механизатора за выполняемую работу, руб./ч;

L - число механизаторов, чел.

Затраты на оплату труда рабочих на подборе [62]:

$$З_p = \frac{C_{\text{тар}}^n L_p}{W_{\text{ч}}}, \quad (113)$$

где $C_{\text{тар}}^n$ - тарифная ставка рабочих на подборе за выполненную работу, руб./ч;

L_p - число рабочих на подборе, чел.

Нормативную прибыль от капиталовложений нашли по формуле [62]:

$$H_n = E_n K_y, \quad (114)$$

где E_n - нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;
 $E_n = 0,15$ [62];

K_y - удельные капиталовложения, руб./га.

Для каждого картофелекопателя удельные капиталовложения определяли из выражения [62]:

$$K_y = \frac{B_i}{T_{год} W_{ч}} \quad (115)$$

В ходе технико-экономического обоснования целесообразности применения картофелекопателя ротационного типа годовой экономический эффект от снижения повреждений клубней в учет не принимался. Очевидно, что данный параметр сильно зависит от большого количества факторов: предпосадочной обработки, времени уборки, температуры воздуха и почвы, типа и влажности почвы, урожайности и т.д. В ходе исследований было принято допущение, что максимальная повреждаемость клубней не должна превышать значений, предъявляемых к картофелекопателям агротехническими требованиями.

Подставляя в вышеперечисленные уравнения исходные данные для каждого варианта картофелекопателя определили их приведенные затраты и годовой экономический эффект от применения усовершенствованного картофелекопателя ротационного типа (таблица 10).

Таблица 10 – Эксплуатационные затраты для КСТ-1,4А и ротационного картофелекопателя

№	Статьи затрат	Обозначение	Единицы измерения	Картофелекопатель КСТ-1,4А	Ротационный картофелекопатель
1	2	3	4	5	6
1	Амортизационные отчисления	$Z_{ам}$	руб./га	357,95	276,69
2	Техническое обслуживание и ремонт	$Z_{то}$	руб./га	200,45	154,95
3	Горюче-смазочные материалы	$Z_{гсм}$	руб./га	1181,71	911,61
4	Хранение техники	$Z_{хр}$	руб./га	1,46	1,16

1	2	3	4	5	6
5	Оплата труда механизаторов	$Z_{\text{мех}}$	руб./га	197,52	157,49
6	Оплата труда рабочих на подборе	Z_p	руб./га	623,97	497,53
7	Всего эксплуатационных затрат	$Z_{\text{экс}}$	руб./га	2563,06	1999,43
8	Удельные капиталовложения	K_y	руб./га	2863,64	2213,51
9	Нормативная прибыль от капиталовложений	H_n	руб./га	429,54	332,03
10	Приведенные затраты на единицу выполненной работы	Z	руб./га	2992,6	2331,46

Из данных таблицы 10 видно, что суммарный экономический эффект от снижения эксплуатационных затрат при использовании прицепного картофелекопателя ротационного типа (вместо серийной модели КСТ-1,4А) составляет 68424,7 рублей в год или 563,63 рубля в расчете на один гектар.

5.2 Выводы

1. Сравнительные результаты расчетов показывают, что при использовании ротационного картофелекопателя, вместо серийной модели КСТ-1,4А, снижаются расходы на ГСМ (911,61 руб./га против 1181,71 руб./га) и увеличивается производительность (0,607 га/ч против 0,484 га/ч).

2. При использовании ротационного картофелекопателя обеспечивается коэффициент использования времени смены 0,86, против 0,8 у КСТ-1,4А.

3. В итоге было определено, что суммарный годовой экономический эффект от снижения эксплуатационных затрат при использовании ротационного картофелекопателя, вместо серийной модели КСТ-1,4А, составляет 68424,7 рублей в год или 563,63 рубля в расчете на один гектар.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ научных работ и конструкций картофелекопателей позволил выявить, что применение четырех лопастного битера и ротационного сепаратора, совместно обеспечивающих интенсивное разрушение пласта и просеивание почвы, позволит повысить эффективность сепарации суглинистой почвы на 30...40%.

2. Обоснована схема ротационного картофелекопателя и получены зависимости, позволившие определить диаметры битера $D_b=300$ мм и роторов сепаратора $D_p=300$ мм, угол наклона выступов ротора $\beta_b=28,5^\circ$, их длину $L_b=130$ мм, радиус скругления $R_b=120$ мм, высоту $H_b=62$ мм, высоту вершин $b_b=15$ мм и количество выступов на роторе $N_b=8$ шт., толщину ротора $B=25$ мм. На конструкцию ротационного картофелекопателя получено положительное решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2018126239/10(041621) «Картофелекопатель ротационный (варианты)».

3. Выведены зависимости, позволившие изыскать значения рабочей частоты вращения битера $n_b=277...339$ мин⁻¹ и роторов зон интенсивной сепарации $n_1=230...260$ мин⁻¹ и окончательной очистки $n_4=200...230$ мин⁻¹ при рабочей скорости ротационного картофелекопателя $V_k=1,1...1,7$ м/с.

4. Изготовлен и экспериментально исследован новый ротационный картофелекопатель, получено уравнение регрессии, устанавливающее закономерность изменения полноты сепарации почвы от значений частоты вращения четырех лопастного битера и роторов, позволившее определить рациональные режимы работы битера $n_b=300...330$ мин⁻¹ и роторов $n_p=230...250$ мин⁻¹, обеспечивающие полноту сепарации 89,7% при скорости движения картофелекопателя $V_k=1,1...1,4$ м/с.

5. Эксплуатационная оценка работы ротационного картофелекопателя показала повышение его производительности до 0,607 га/ч при снижении расхода топлива до 11,9 кг/ч и повреждаемости клубней до 1,4...2,7%.

6. Расчет экономической эффективности показал, что совмещение в конструкции картофелекопателя усовершенствованного битера и ротационного сепаратора является целесообразным. Расчетный годовой эффект от внедрения составил 68424,7 рублей в год или 563,63 рубля в расчете на один гектар.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алакин В.М. Исследование технологического процесса работы битера в комплексе с роторно-пальцевой сепарирующей поверхностью / В.М. Алакин, С.А. Плахов, Г.С. Никитин // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 24–26 ноября 2015 г. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. - Т. 2. – С. 99-102.
2. Алакин В.М. Картофелекопатель с ротационной сепарирующей поверхностью / В.М. Алакин, Г.С. Никитин // Картофель и овощи. – 2018. - № 5. – С. 32–34.
3. Алакин В.М. Обоснование угловой скорости вращения рабочих органов роторного картофелекопателя / В.М. Алакин, С.А. Плахов, Г.С. Никитин // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 25–27 ноября 2014 г. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. - Т. 2. – С. 260-262.
4. Алакин В.М. Параметры и режимы работы роторно-пальцевой сепарирующе-калибрующей поверхности, повышающие эффективность обработки вороха картофеля: дис. ... кандидата технических наук: 05.20.01 / В.М. Алакин; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет». - Санкт-Петербург-Пушкин, 1996. - 184 с.
5. Алакин В.М. Предпосылки к разработке роторного мини-картофелекопателя / В.М. Алакин, С.А. Плахов, Г.С. Никитин // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 10–12 декабря 2013 г. - М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. - Т. 3. – С. 112-116.

6. Алакин В.М. Развитие сепарирующих устройств картофелеуборочных машин / В.М. Алакин, Г.С. Никитин // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 15–17 ноября 2016 г. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – Т. 5. – С. 236-237.

7. Алакин В.М. Результаты исследований технологического процесса картофелекопателя / В.М. Алакин, Г.С. Никитин // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – Т. 12. – № 5. – С. 14–19.

8. Алесенко В.М. К определению линейной скорости сепарирующего элеватора, расположенного за лопастным битером / В.М. Алесенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства: Республиканский межведомственный тематический научно-технический сборник. – Вып. 8. – Мн.: Урожай, 1970. – С. 144–149.

9. Алямовский А.А. Инженерные расчёты в Solidworks Simulation / А.А. Алямовский. – М.: ДМК-Пресс, 2010. – 235 с.

10. Анализ эксплуатационно-технологических требований к картофелеуборочным машинам и показателей их работы в условиях рязанской области / Г.К. Рембалович, И.А. Успенский, А.А. Голиков, Р.В. Безносок [и др.] // Вестник РГАТУ. – 2013. – № 1 (17). – С. 64-68.

11. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон. – 8-е изд., перераб. - М.: Наука. 1984. – 483 с.

12. Безносок Р.В. Совершенствование органа выносной сепарации картофелеуборочных машин: автореф. дис. ... кандидата технических наук: 05.20.01 / Р.В. Безносок; Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. – Саранск, 2013. – 20 с.

13. Боровиков В.П. Прогнозирование в системе статистики / В.П. Боровиков, Г.И. Ивченко. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 382 с.

14. Борычев С.Н. Машинные технологии уборки картофеля с использованием усовершенствованных копателей, копателей-погрузчиков и

комбайнов: дис. докт. техн. наук: 05.20.01 / С.Н. Борычев; Рязан. гос. с.-х. акад. им. П.А. Костычева. - Рязань, 2008. – 484 с.

15. Борычев С.Н. Проблемы при уборке корнеклубнеплодов / С.Н. Борычев, С.С. Рогов, И.А. Успенский // Энергосберегающие технологии использования и ремонта машинно – тракторного парка: материалы научно-практической конференции. – Рязань: Изд-во ФГБОУ ВПО РГАТУ, 2004. – № 1. – С. 57– 58.

16. Борычев С.Н. Технологии и машины для механизированной уборки картофеля: Монография. – Рязань: РГСХА, 2011. – 220 с.

17. Бышов Н.В. Научно-методические основы расчета сепарирующих рабочих органов и повышение эффективности картофелеуборочных машин: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01; 05.20.04 / Н.В. Бышов. - Рязань, 2000. – 414 с.

18. Бышов Н.В. Принципы и методы расчета и проектирования рабочих органов картофелеуборочных комбайнов: Монография / Н.В. Бышов, А.А. Сорокин. - Рязань: Изд-во ФГБОУ ВПО РГАТУ, 1999. - 134 с.

19. Василенко П.М. Элементы методики математической обработки результатов экспериментальных исследований / П.М. Василенко – М., 1958. – 217 с.

20. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г.В. Веденяпин – М.: Колос, 1967. – 159 с.

21. Верещагин Н.И. Пути снижения повреждаемости картофеля при механизированной уборке / Н.И. Верещагин, М.Н. Ерохин // Достижения науки и передовой опыт в производстве: сборник трудов ЦНТИПиР Министерства с/х РФ. - 1992. – № 2. – 286 с.

22. Верещагин Н.И. Рабочие органы машин для возделывания, уборки и сортировки картофеля / Н.И. Верещагин, К.А. Пшеченков. - М.: Машиностроение, 1965. - 268 с.

23. Верменко Я.И. Исследование процесса сепарации в картофелеуборочных машинах с ротационными рабочими органами: автореф. дис. ... кандидата технических наук: 05.20.01 / Я.И. Верменко; Украинская ордена Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия. - Киев, 1964. - 30 с.

24. Взаимосвязь характеристик повреждаемости клубней с параметрами технического состояния сельскохозяйственной техники в процессе производства картофеля / Г.К. Рембалович, И.А. Успенский, Г.Д. Кокорев [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. - 2011. - № 74. - С. 197-207.

25. Воронков В.В. Интенсификация сепарирующей способности прутковых элеваторов картофелеуборочных машин за счет предварительного разрушения клубненосного пласта / В.В. Воронков // Аграрный вестник Верхневолжья. – 2014. – № 2. – С. 50-54.

26. Герасимов А.А. Критерии оценки повреждаемости клубней / А.А. Герасимов, А.С. Пермякова // Механизация и электрификация соц. с/х. - 1974. - №7. - С.48-49.

27. Герасимов А.А. О повреждаемости клубней в картофелеуборочном комбайне / А.А. Герасимов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. - 1974. - №6. - С. 19-20.

28. Голиков А.А. Изыскание перспективных способов снижения повреждений клубней при машинной уборке картофеля / А.А. Голиков // Научный журнал КубГАУ. – 2015. - № 105(01). – С. 1-11.

29. Голиков А.А. Перспективное направление развития сепарирующих устройств корнеклубнеуборочных машин / А.А. Голиков // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. - 2013. - № 20. - С. 103-105.

30. Голиков А.А. Совершенствование технологического процесса и рабочего органа сепарации картофелеуборочных машин: дис. ... кандидата технических наук: 05.20.01 / А.А. Голиков; ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева». - Рязань, 2014.- 138 с.

31. Горячкин В.П. Собрание сочинений: в 3 т. / В.П. Горячкин - М.: Колос, 1968. - Т. 2. - 455 с.

32. ГОСТ 23729-88. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки специализированных машин. – Введ. 30.03.1988. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 5 с.
33. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. – Взамен ГОСТ 251000-95; введ. 01.01.2013. - М.: Стандартиформ, 2013. – 38 с.
34. ГОСТ Р 52778-2007. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы эксплуатационно-технологической оценки. – Введ. 01.07.2008. - М.: Стандартиформ, 2008. – 44 с.
35. ГОСТ Р 54784-2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы оценки технических параметров. – Введ. 01.03.2012. - М.: Стандартиформ, 2012. – 40 с.
36. Гудзенко И.П. Машины для возделывания и уборки картофеля / И.П. Гудзенко, Н.В. Фирсов. - М.: Машиздат, 1962. – 276 с.
37. Диденко Н.Ф. Машины для уборки овощей / Н.Ф. Диденко, В.А. Хвостов, В.П.Медведев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1984. - 320 с.
38. Долгов И.А. Уборочные сельскохозяйственные машины. (Конструкция, теория, расчет): Учебник. – Ростов н/Д.: Издательский центр ДГТУ, 2003. – 707 с.
39. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статической обработки результатов исследования) / Б.А. Доспехов. –М.: Колос, 1973. –336 с.
40. Инновационные решения вторичной сепарации: результаты испытаний в картофелеуборочных машинах / Д.Н. Бышов, С.Н. Бoryчев, И.А. Успенский [и др.] // Вестник РГАТУ. – 2011. – № 4(12). - С. 34-37.
41. Инновационные технические средства для транспортировки плодоовощной продукции при внутрихозяйственных перевозках / С.Н. Бoryчев, И.А. Успенский, И.А. Юхин [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. - 2012. - № 2. - С. 37-40.
42. Ищук Д.Н. Исследование прочности клубней и почвенных комков при уборке картофеля / Д.Н. Ищук // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. - 2010. - № 3. - С. 67-69.

43. Картофелеуборочная машина: пат. 2440711 Рос. Федерация: МПК А 01 D 33/00 / М.Б. Угланов, И.Б. Тришкин, Р.А. Чесноков, В.Д. Липин, М.В. Паршина, Е.В. Саликов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева». - № 2010110795/13; заявл. 22.03.2010; опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3. – 9 с.

44. Кленин Н.И. Сельскохозяйственные машины / Н.И. Кленин, С.Н. Киселев, А.Г. Левшин. М.: КолосС, 2008. – 816 с.

45. Колчин Н.Н. Возрождение производства специализированной отечественной техники – приоритетная государственная задача / Н.Н. Колчин // Картофель и овощи. – 2011. - №4. - С. 3–5.

46. Колчин Н.Н. Изыскание и исследование новых рабочих органов для отделения клубней картофеля от земли на тяжелых почвах пониженной влажности: исследования по механизации уборки картофеля / Н.Н. Колчин.- М.: Изд-во МСХ СССР, 1958. - С. 71-78.

47. Колчин Н.Н. Картофель: Технологии и комплексы машин для возделывания важнейших сельскохозяйственных культур / Н.Н. Колчин [и др.]. – М.: ИНФРА–М, 1997. - Ч. 1. – С. 1-104.

48. Колчин Н.Н. Комплекс специальных машин для картофелеводства / Н.Н. Колчин // Техника и оборудование для села. - 2011. - №8. - С. 18–21.

49. Колчин Н.Н. Современная техника для машинного производства картофеля / Н.Н. Колчин // Тракторы и сельхозмашины. - 2011. – №6. – С. 51–54.

50. Костенко М. Ю. Вероятностная оценка сепарирующей способности элеватора картофелеуборочной машины / М. Ю. Костенко, Н. А. Костенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2009. - №12. – С. 4.

51. Кривоногов Н.И. К обоснованию параметров встряхивателей сепараторов картофелеуборочных машин / Н.И. Кривоногов, С.А. Герасимов // Тракторы и сельхозмашины. – 1967. – № 6. – С. 31-33.

52. К вопросу об интенсификаторах первичной сепарации почвы в картофелеуборочных машинах / Н.А. Рязанов, Г.К. Рембалович, И.А. Успенский, С.Н. Борычев // Вестник ФГОУ ВПО РГАТУ. – 2010. - № 1. С. 54-57.

53. Ларюшин Н.П. Теоретическое обоснование работы выкапывающе-сепарирующего рабочего органа / Н.П. Ларюшин // Нива Поволжья. – 2008. - № 4. – С. 47-53.

54. Максимов А.Г. Совершенствование технологического процесса сепарации почвенно-картофельного пласта путем обоснования конструктивных и технологических параметров картофелекопателя: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.Г. Максимов; Сев.-Зап. науч.-исслед. ин-т механизации и электрификации сел. хоз-ва. – СПб., 2008. – 176 с.

55. Мангушев Р.А. Механика грунтов: Учебник / Р.А. Мангушев, В.Д. Карлов, И.И. Сахаров. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. - 264 с.

56. Масалимов И.Х. Определение тягового сопротивления картофелекопателя / И.Х. Масалимов, Р.Р. Ибрагимов, Р.С. Глимшин, Т.А. Хохлова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2014. - №6. - С. 70-71.

57. Масленков И.Н. Исследование и сравнительная оценка ротационных сепараторов картофелеуборочных машин: автореф. дис. ... кандидата технических наук: 05.20.01 / И.Н. Масленков; Объедин. Учен. Совет Всесоюз. науч.-исслед. ин-та механизации сельск. хоз-ва (ВИМ) и Всесоюз. науч.-исслед. ин-та электрификации сельск. хоз-ва (ВИЭСХ). - Москва, 1974. - 26 с.

58. Математическая модель технологического процесса картофелеуборочного комбайна при работе в условиях тяжелых суглинистых почв / Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, Г.К. Рембалович [и др.] // Вестник РГАТУ. – 2014. – №4. – С. 59-64.

59. Машинные технологии и техника для производства картофеля / С.С. Туболев, С.И. Шеломенцев, К.А. Пшеченков, В.Н. Зейрук – М.: Агроспас, 2010. – 316 с.

60. Мацепуро М.Е. Технологические основы механизации уборки картофеля / М.Е. Мацепуро. – Минск: АН БССР, 1959. – 324 с.

61. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. Утверждена 23.07.1997. – М., 1998. – 87 с.

62. Методика определения экономической эффективности технологии и сельскохозяйственной техники / А.В. Шпилько, В.И. Драгайцев, П.А. Тулапин [и др.] – М.: ВНИИЭСХ, 1998. – 219 с.

63. Некоторые вопросы организации транспортных работ при машинной уборке картофеля / И.А. Успенский, Г.К. Рембалович, Г.Д. Кокорев [и др.] // Вестник РГАТУ. – 2010. – № 4 (8). – С. 72-74.

64. Никитин Г.С. Определение кинематических параметров интенсивной зоны сепарации ротационной рабочей поверхности / Г.С. Никитин, В.М. Алакин // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 13–15 ноября 2018 г. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. - Т. 2. – С. 102-105.

65. Никитин Г.С. Определение оптимальных параметров и режимов работы лопастного битера / Г.С. Никитин, В.М. Алакин, С.А. Плахов // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, 19–21 апреля 2016 г. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. - Т. 2. – С. 75-77.

66. Никитин Г.С. Определение рациональной скорости вращения рабочих органов интенсивной зоны сепарации ротационного картофелекопателя // Г.С. Никитин, В.М. Алакин, С.А. Плахов // Аграрный научный журнал. – 2019. - № 6. – С. 96-100.

67. Никитин Г.С. Результаты экспериментальных исследований ротационного картофелекопателя в полевых условиях / Г.С. Никитин // Инновационные разработки для развития отраслей сельского хозяйства региона:

Сборник научных трудов: под редакцией В.Н. Мазурова. - Калуга: ФГБНУ «Калужский НИИСХ», 2019. – С. 43-46.

68. Николаев В.А. Совершенствование технических средств обработки почвы: Монография. – Ярославль: Издательство ФГОУ ВПО «Ярославская ГСХА», 2010. – 244 с.

69. Определение тягового сопротивления картофелекопателя / И.Х. Масалимов, Р.Р. Ибрагимов, Р.С. Глимшин, Т.А. Хохлова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2014. - № 6. – С. 70-71.

70. Основы проектирования и расчет сельскохозяйственных машин / Л.А. Резников, В.Т. Ещенко, Г.Н. Дьяченко и др. - М.: Агропромиздат, 1991. – 543 с.

71. Остроумов С.С. К выбору рациональных параметров роторного сепаратора картофелекопателя / С.С. Остроумов, А.В. Кузьмин // Вестник КрасГАУ. - 2014. - № 9. - С. 182-187.

72. Остроумов С.С. Обоснование параметров ротора сепаратора картофелеуборочной машины / С.С. Остроумов, А.В. Кузьмин // Вестник ИрГСХА. - 2015. - № 66. - С. 117-123.

73. Остроумов С.С. Параметры подкапывающего органа картофелеуборочной машины / С.С. Остроумов // Вестник ИрГСХА. - 2014. - № 64. - С. 103-107.

74. Остроумов С.С. Результаты полевых испытаний нового картофелеуборочного комбайна / С.С. Остроумов // Вестник ИрГСХА. - 2009. - № 36. - С. 86-92.

75. Официальный сайт производителя сельскохозяйственной техники ЗАО «Колнаг» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.kolnag.ru>.

76. Официальный сайт производителя сельскохозяйственной техники Dewulf [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.dewulfgroup.com>.

77. Официальный сайт производителя сельскохозяйственной техники Grimme Landmaschinenfabrik GmbH & Co. KG [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.grimme.de>.

78. Официальный сайт производителя сельскохозяйственной техники Standen Pearson [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.standen.co.uk>.

79. Официальный сайт Росстата РФ [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.gks.ru>.

80. Оценка перспективной технологической схемы картофелеуборочного комбайна / И.А. Успенский, Г.К. Рембалович, М.Ю. Костенко, Р.В. Безносюк // Известиях Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2018. - № № 1 (49). – С. 262-269.

81. Петров Г.Д. Картофелеуборочные машины. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1984. - 320 с.

82. Плахов С.А. Обоснование технологического процесса и основных параметров виброротационной сортировки картофеля: дис. ... кандидата технических наук: 05.20.01 / С.А. Плахов; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I». – Калуга, 2014. – 144 с.

83. Плахов С.А. Обоснование формы пальцев роторов сепаратора картофелекопателя / С.А. Плахов, В.М. Алакин, Г.С. Никитин // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 10–12 декабря 2013 г. - М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. - Т. 3. – С. 98-101.

84. Повышение надежности технологического процесса и технических средств машинной уборки картофеля по параметрам качества продукции / Г.К. Рембалович, И.А. Успенский, Р.В. Безносюк, Н.А. Рязанов, В.Г. Селиванов // Техника и оборудование для села. - 2012. - №3. - С. 6-8.

85. Попов И.И. Разработка и обоснование параметров ротационных рабочих органов картофелеуборочных машин: дис. ... кандидата технических наук: 05.20.01 / И.И. Попов; Казанская Государственная Сельскохозяйственная Академия. - Казань, 1997. - 210 с.

86. Порошин Д.Н. Обоснование конструктивных параметров картофелекопателя с роторно-пальцевыми рабочими органами / Д.Н. Порошин // Северо-Западный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства. – 2001. - № 72. – С. 41-49.

87. Результаты исследования интенсивности сепарации на лабораторном прутковом элеваторе при регулировании загрузки / В.Ф. Некрашевич, Н.А. Костенко, М.Ю. Костенко, И.Н. Горячкина // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2010. - № 3. – С. 73-75.

88. Рембалович Г.К. Теоретические основы исследования рабочих органов на основе моделирования процесса вторичной сепарации в картофелеуборочных машинах / Г.К. Рембалович, Р.В. Безносюк // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 89. – С. 700-720.

89. Рембалович Г.К. Исследование равномерности просеивания почвы по ширине конвейера первичной сепарации в картофелеуборочных машинах / Г.К. Рембалович // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2013. - № 4. – С. 79-82.

90. РТМ-23236-72 Основы планирования экспериментов в сельскохозяйственных машинах. – М., 1974. – 116 с.

91. Сельскохозяйственные машины. Теория и технологический расчет / Б.Г. Турбин, А.Б. Лурье, С.М. Григорьев, Э.М. Иванович, С.В. Мельников. Ленинград: Машиностроение, 1967. - 583 с.

92. Сельскохозяйственные машины и оборудование. Том IV-16 / И.П. Ксенович, Г.П. Варламов, Н.Н. Колчин и др.; под ред. И.П. Ксеновича. М.: Машиностроение, 2002. – 720 с.

93. Сепарирующее устройство корнеклубнеуборочной машины: пат. 2267900 Рос. Федерация: МПК А 01 D 33/08 С.Н. Бoryчев; заявитель и патенто-обладатель Государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт механизации агрохимического и материально-

технического обеспечения сельского хозяйства». - № 2004114094/12; заявл. 07.05.2004; опубл. 20.01.2006, Бюл. № 2. – 8 с.

94. Солодухин А.П. Исследование эффективности применения удара для разрушения картофельной грядки / А.П. Солодухин // Тр. ЦНИИМЭСХ НЗ СССР, 1964. – Т.3. – С. 56–67.

95. Сорокин А.А. Теория и расчет картофелеуборочных машин / А.А. Сорокин. – М.: ВИМ, 2006. – 158 с.

96. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

97. Степанов А.Н. Определение величины перекрытия роторно-пальцевых сепарирующих элементов картофелеуборочной машины / Степанов А.Н., Порошин Д.Н. // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства в Северо-Западной зоне России. – 2002. - № 73. – С. 119-124.

98. СТО АИСТ 1.17–2010. Испытания сельскохозяйственной техники и агротехнологий. Методы сравнительной оценки с использованием многофакторного корреляционно-регрессионного анализа. - Введ. 15.09.2011. – Новокубанск: КубНИИТиМ, 2011. – 18 с.

99. СТО АИСТ 8.5–2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для уборки и послеуборочной обработки картофеля. Методы оценки функциональных показателей. – Введ. 15.09.2011. – Новокубанск: КубНИИТиМ, 2011. – 39 с.

100. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: учебник для втузов / С. М. Тарг. – 19-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2009. – 416 с.

101. Технологическое и теоретическое обоснование конструктивных параметров органов вторичной сепарации картофелеуборочных комбайнов для работы в тяжелых условиях / Н.В. Бышов, С.Н. Бoryчев, И.А. Успенский [и др.] // Вестник РГАТУ. – 2012. — № 4. – С. 87-90.

102. Угланов М.Б. Разработка комплекса машин для уборки картофеля на основе совершенствования рабочих органов и рационального их сочетания:

автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / М.Б. Угланов; Лен. гос. аграрн. ун-т. – Ленинград, 1991. - 44 с.

103. Успенский И.А. Основы снижения энергозатрат в сельскохозяйственном производстве (на примере картофеля) / И.А. Успенский и др. // Монография. – Рязань, 2010. – 276 с.

104. Успенский И.А. Сепарирующая горка с лопастным отбойным валиком / И.А. Успенский, Г.К. Рембалович, Р.В. Безносок // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2010. - № 2. – С. 57-59.

105. Федоров Д.А. Повышение эффективности уборки картофеля путем совершенствования конструктивных и технологических параметров картофелекопателя: автореф. дис. ... кандидата технических наук: 05.20.01 / Д.А. Федоров; Сев.-Зап. науч.-исслед. ин-т механизации и электрификации сел. хоз-ва. - Санкт-Петербург-Павловск, 2005. – 24 с.

106. Халанский В.М. Сельскохозяйственные машины / В.М. Халанский, И.В. Горбачев. М.: Колос, 2003. - 623 с.

107. Чаткин М.Н. Особенности динамического анализа работы почвообрабатывающих фрезерных агрегатов / М.Н. Чаткин, В.Ф. Купряшкин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2006. - №12. - С. 9- 11.

108. Черноиванов В.И. Мировые тенденции машинно-технологического обеспечения интеллектуального сельского хозяйства / В.И. Черноиванов, А.А. Ежевский, В.Ф. Федоренко. – М.: ФГБНУ Росинформагротех, 2012. – 284 с.

109. Чесноков Р.А. Технология и элеватор картофелеуборочной машины с интенсификатором сепарации почвы: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Р.А. Чесноков. – Рязань, 2005. - 154 с.

110. Якутин Н.Н. Оригинальное средство интенсификации сепарации / Н.Н. Якутин, Н.В. Бышов // Сельский механизатор. – 2014. – № 7. – С. 14-15.

111. Якутин Н.Н. Результаты экспериментальных исследований процесса машинной уборки картофеля усовершенствованным копателем КТН-2В / Якутин Н.Н., Бышов Н.В., Рембалович Г.К., Доронкин Ю.В. // Политематический сетевой

электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №05(099). – С. 1052-1061. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/05/pdf/72.pdf>.

112. Якутин Н.Н. Совершенствование технологического процесса и средства интенсификации сепарации картофелеуборочных машин: дис. ... кандидата технических наук: 05.20.01 / Н.Н. Якутин; ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева». - Рязань, 2014.- 132 с.

113. Allan L Jensen Performance of machinery in potato production in one growing season / Allan L Jensen, Claus G Sorensen, Dionysis Bochtis, Zhou Kun // Spanish journal of agricultural research. – 2015. - № 3. 12-32.

114. Brinkmann W. Geräte und Verfahren für die Kartoffelproduktion / W. Brinkmann, H. Heege, F. Tebrügge // Landwirtschaftliches Lehrbuch 4. – Landtechnik. Verlag Euren Ulmer, Stuttgart, 1985. 339-362.

115. Dreszer K. Maszyny rolnicze / K. Dreszer. - Lublin: Wyd. AR, 2000. – 26 p.

116. Godesa T. Determination of minimal cutting speed by flailing potato vines. Acta agriculturae slovenica / T. Godesa // Ljubjana, 2004. - Vol. 83. – N 1. 137–146.

117. Peters R. Trends in der Kartoffeltechnik / R. Peters // Landtechnik, 2003. - Jg. 58. – H.8. 366–367.

118. Struik P.C. Seed potato technology / P.C. Struik, S.G. Wiersema. – Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 1999. - 383 p.

119. Sharma A.P. Design, Development and field evaluation of an oscillatory potato digger / Sharma A.P., Verma S.R., Bomsal A.S. // Agricultural mechanization In Asia, Africa and Latin America. – 1986. - № 17. 60-65.

120. Yong Ying Sang Parametric Modeling and Moving Simulation of Vibrating Screen and Tubers on Potato Harvester / Yong Ying Sang, Hua Li Yu, Jing Xia Jia // Applied Mechanics and Materials. - 2012; August 2012. 627-632.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Исходные данные для расчета скорости схода части
картофельного пласта с лопасти бitera в программе Mathcad**

Угловая скорость бitera: $\omega_b := 29 \text{ с}^{-1}$

Коэффициент трения скольжения почвы по резине: $f := 0.7$

Ускорение свободного падения: $g := 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

Радиус щитка бitera: $R_{\text{щ}} := 0.08 \text{ м}$

Угол поворота бitera при котором часть пласта сходит с лопасти: $\beta_p := 1.5 \text{ радиан}$

**Методика расчета скорости схода части картофельного
пласта с лопасти бitera**

Время движения части картофельного вороха по лопасти бitera:

$$t_b := \frac{\beta_p}{\omega_b}$$

Корни характеристического уравнения:

$$B_1 := 0.5 \cdot \omega_b$$

$$B_2 := -2 \cdot \omega_b$$

Постоянные коэффициенты неоднородного уравнения:

$$A := \frac{f \cdot g}{\omega_b^2 \cdot (f^2 + 1)}$$

$$B := \frac{g \cdot (1 - f^2)}{2 \cdot \omega_b^2 (1 + f^2)}$$

Постоянные интегрирования:

$$C1 := \frac{B2 \cdot (A - R_{\text{ш}}) + B \cdot \omega b}{B1 - B2}$$

$$C2 := \frac{B1 \cdot (R_{\text{ш}} - A) + B \cdot \omega b}{B1 - B2}$$

Расстояние от края лопасти до края части картофельного пласта:

$$x := C1 \cdot e^{B1 \cdot t_6} + C2 \cdot e^{B2 \cdot t_6} + A \cdot \cos(\omega b \cdot t_6) + B \cdot \sin(\omega b \cdot t_6)$$

Скорость отрыва части картофельного пласта от лопасти бitera:

$$x' := C1 \cdot B1 \cdot e^{B1 \cdot t_6} + C2 \cdot B2 \cdot e^{B2 \cdot t_6} + B \cdot \omega b \cdot \cos(\omega b \cdot t_6) - A \cdot \omega b \cdot \sin(\omega b \cdot t_6)$$

Результаты расчета скорости схода части картофельного пласта с лопасти бitera

Время движения части картофельного вороха по лопасти бitera:

$$t_6 = 0.052 \quad \text{с}$$

Корни характеристического уравнения:

$$B1 = 14.5 \quad \text{с}^{-1}$$

$$B2 = -58 \quad \text{с}^{-1}$$

Расстояние от края лопасти до края части картофельного пласта:

$$x = 0.131 \quad \text{м}$$

Скорость отрыва части картофельного пласта от лопасти бitera:

$$x' = 1.655 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**Исходные данные для расчета проекций скорости отражения
компонента картофельного вороха в программе Mathcad**

Толщина ротора: $B := 0.025 \text{ м}$

Высота вершины выступа: $b_v := 0.015 \text{ м}$

Расстояние от центра ротора до середины выступа: $R1 := 0.12 \text{ м}$

Длина выступа ротора: $L_v := 0.13 \text{ м}$

Коэффициент трения скольжения клубней по резине: $f_p := 0.7$

Коэффициент восстановления резины: $k_v := 0.4$

Ускорение свободного падения: $g := 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

Модуль упругости ротора: $E_p := 4400000 \text{ Па}$

Максимальный прогиб выступа ротора: $S_v := 0.0016 \text{ м}$

Масса компонента картофельного вороха: $m4 := 0.16 \text{ кг}$

Угол поворота четвертой секции: $\alpha_4 := 0.73 \text{ радиан}$

Угол наклона выступа ротора: $\beta_v := 0.51 \text{ радиан}$

Угол падения компонента картофельного вороха: $\psi_p := 0.78 \text{ радиан}$

Угловая скорость четвертой секции сепаратора: $\omega_4 := 21 \text{ с}^{-1}$

Скорость падения компонента картофельного вороха: $V_s := 2.5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Методика расчета проекций скорости отражения компонента картофельного вороха

Момент инерции сечения выступа:

$$I_B := \frac{b_B \cdot B^3}{12}$$

Угол $\varphi 1$:

$$\varphi 1 := \alpha 4 + \beta_B$$

Окружная скорость середины выступа:

$$V 4 := \omega 4 \cdot R 1$$

Проекция на ось x скорости соударения компонента картофельного вороха с выступом ротора:

$$V_x := V_s \cdot \cos(\psi \pi) + V 4 \cdot \cos(\beta_B)$$

Проекция на ось y скорости соударения компонента картофельного вороха с выступом ротора:

$$V_y := V_s \cdot \sin(\psi \pi) - V 4 \cdot \sin(\beta_B)$$

Время соударения компонента картофельного вороха с выступом ротора:

$$\tau_y := \frac{L_B^3 \cdot m 4 \cdot (1 + k_B) \cdot V_y}{L_B^3 \cdot m 4 \cdot g \cdot \sin(\varphi 1) - 3 \cdot E_p \cdot I_B \cdot S_B}$$

Среднее значение ударной нормальной реакции:

$$N_{cp} := \frac{m 4}{\tau_y} \cdot [g \cdot \tau_y \cdot \sin(\varphi 1) - (1 + k_B) \cdot V_y]$$

Проекция на ось x скорости отражения компонента картофельного вороха:

$$U_x := V_s \cdot \cos(\psi \pi) + \omega 4 \cdot R 1 \cdot \cos(\beta_B) + \frac{1}{m 4} \cdot f_p \cdot N_{cp} \cdot \tau_y - g \cdot \tau_y \cdot \cos(\varphi 1)$$

Проекция на ось y скорости отражения компонента картофельного вороха:

$$U_y := V_s \cdot \sin(\psi \pi) - \omega 4 \cdot R 1 \cdot \sin(\beta_B) + \frac{1}{m 4} \cdot N_{cp} \cdot \tau_y - g \cdot \tau_y \cdot \sin(\varphi 1)$$

Результаты расчета проекций скорости отражения компонента картофельного вороха

Момент инерции сечения выступа:

$$I_B = 3.375 \times 10^{-8} \text{ м}^4$$

Угол φ_1 :

$$\varphi_1 = 1.24 \text{ радиан}$$

Окружная скорость середины выступа:

$$V_4 = 2.52 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Проекция на ось x скорости соударения компонента картофельного вороха с выступом ротора:

$$V_x = 3.977 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Проекция на ось y скорости соударения компонента картофельного вороха с выступом ротора:

$$V_y = 0.528 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Время соударения компонента картофельного вороха с выступом ротора:

$$t_y = 0.07 \text{ с}$$

Среднее значение ударной нормальной реакции:

$$N_{\text{ср}} = 0.324 \text{ Н}$$

Проекция на ось x скорости отражения компонента картофельного вороха:

$$U_x = 3.797 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Проекция на ось y скорости отражения компонента картофельного вороха:

$$U_y = -0.211 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБНУ

«Калужский

Научно-

исследовательский институт

сельского хозяйства»

Мазуров В.Н.

2019 г.



АКТ

о внедрении в производство

результатов научно-исследовательской работы по теме

«Повышение эффективности рабочего процесса картофелекопателя путем
обоснования параметров и режимов ротационного сепаратора»

Мы, нижеподписавшиеся, руководитель научного подразделения Семешкина Полина Сергеевна, начальник экспериментально-производственного отдела Козырь Александр Владимирович и научный сотрудник Рябченко Людмила Николаевна ФГБНУ «Калужский Научно-исследовательский институт сельского хозяйства» с одной стороны и заведующий кафедрой М6-КФ «Колесные машины и прикладная механика» Булычёв Всеволод Валерьевич, доцент кафедры М6-КФ «Колесные машины и прикладная механика» Алакин Виктор Михайлович и ассистент кафедры М6-КФ «Колесные машины и прикладная механика» Никитин Геннадий Сергеевич Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» с другой стороны, составили настоящий акт на предмет передачи и полевых испытаний нового образца картофелекопателя с ротационным сепарирующим устройством.

Предприятие предоставило уборочные площади посадок картофеля для проведения испытаний картофелекопателя. В присутствии представителей предприятия, агрегатом в составе МТЗ-80 и ротационного картофелекопателя была произведена уборка картофеля сортов «Удача», «Калужский» и «Ред-Скарлетт». Полевые условия при уборке картофеля следующие: почвы - серые лесные и суглинистые, влажность - 9,3...12,8%,

твёрдость - 0,39...0,44 Мпа, средняя урожайность 27,5 т/га, ширина междурядий 75 см. Объем выполненных уборочных работ составил 13,5 га.

Конструкция и режимы работы картофелекопателя соответствовали результатам исследований: скорость движения - 1,1...1,7 м/с, скорость вращения битера 270...330 мин⁻¹ и скорость вращения роторов сепаратора 200...260 мин⁻¹.

В результате испытаний достигнута полнота сепарации почвы 89,7% при скорости картофелекопателя 1,3..1,5 м/с, скорости вращения битера 300 мин⁻¹ и скорости вращения роторов 242 мин⁻¹, повреждаемость клубней не превышала 2%, потери деловых клубней составили 1,2%. Производительность агрегата МТЗ-80 с ротационным картофелекопателем составила - 0,607 га/ч, а удельный расход топлива - 11,9 кг/ч.

Ожидаемый годовой экономический эффект от использования в ФГБНУ «Калужский Научно-исследовательский институт сельского хозяйства» ротационного картофелекопателя составит 68424,7 рублей в год или 563,63 рубля в расчете на один гектар.

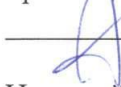
Рекомендовано практическое и научное применение схемы и конструкции ротационного картофелекопателя, закономерности изменения полноты сепарации почвы роторами в зависимости от скорости картофелекопателя и режимов вращения битера и роторов, а также от их рациональных значений.

От ФГБНУ «Калужский Научно-исследовательский институт сельского хозяйства»

Руководитель научного подразделения

 Л.С. Семешкина

Начальник экспериментально-производственного отдела

 А.В. Козырь

Научный сотрудник

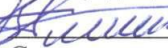
 Л.Н. Рябченко

От Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Д.т.н., доцент

 В.В. Булычёв

К.т.н., доцент

 В.М. Алакин

Соискатель

 Г.С. Никитин

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Калужского филиала

Российского государственного
аграрного университета – МСХА

имени К.А. Тимирязева

 Слипец А.А.

«05» _____ 09 2018 г.

Акт о внедрении в учебный процесс результатов
научно-исследовательской работы по теме
«Повышение эффективности рабочего процесса картофелекопателя
путем обоснования параметров и режимов ротационного сепаратора»

Калужским филиалом ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева» получены результаты научно-исследовательской работы Никитина Геннадия Сергеевича на тему «Повышение эффективности рабочего процесса картофелекопателя путем обоснования параметров и режимов ротационного сепаратора», выполненной на кафедре М6-КФ «Колесные машины и прикладная механика» Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана».

В материалы для внедрения в учебный процесс и научную работу входят:

- аналитическая зависимость, уравнение статики для исследования процессов мгновенного удержания и устойчивого перемещения части пласта почвы выступом;
- аналитические зависимости в виде уравнений динамики, позволяющие описать процесс безотрывного перемещения компонентов картофельного вороха в зависимости от режима вращения роторов сепаратора;
- закономерность изменения полноты сепарации почвы от скорости картофелекопателя, режимов вращения битера и роторов и возможности определения их рациональных параметров.

Указанные материалы включены в лекционный курс, практические занятия и курсовой проект по дисциплине «Сельскохозяйственные машины» для бакалавров по направлению подготовки 35.03.06 – Агроинженерия, а также использованы при выполнении научных работ по совершенствованию машин для уборки столовых корнеплодов и свеклы.

Декан агрономического факультета
к.б.н., доцент



С.Д. Малахова

Заведующий кафедрой механизации
сельскохозяйственного производства,
д.т.н., профессор



В.Н. Сидоров

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Форма № 01 ИЗ-2014

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(РОСПАТЕНТ)

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993. Телефон (8-499) 240-60-15. Факс (8-495) 531-63-18

На № - от 16.04.2019

Наш № 2018126239/10(041621)

*При перепишке просим ссылаться на номер заявки***Исходящая корреспонденция от****17.05.2019**Алакину Виктору Михайловичу
ул. Молодежная, 48, кв. 130
г.Калуга
248009**РЕШЕНИЕ****о выдаче патента на изобретение**

(21) Заявка № 2018126239/10(041621)

(22) Дата подачи заявки 16.07.2018

В результате экспертизы заявки на изобретение по существу установлено, что заявленная группа изобретений относится к объектам патентных прав, соответствует условиям патентоспособности, сущность заявленного изобретения (изобретений) в документах заявки раскрыта с полнотой, достаточной для осуществления изобретения (изобретений)*, в связи с чем принято решение о выдаче патента на изобретение.

Заключение по результатам экспертизы прилагается.

Приложение: на 5 л. в 1 экз.

Заместитель начальника
управления - Начальник
отдела патентного права

Документ подписан электронной подписью
Сведения о сертификате ЭП
Сертификат
25155CA55794E992E81194F4C82273BA
Владелец Галковская
Виктория Геннадьевна
Срок действия с 30.11.2018 по 08.02.2027

В.Г. Галковская



*Проверка достаточности раскрытия сущности заявленного изобретения проводится по заявкам на изобретения, поданным после 01.10.2014.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРТИЗЫ

(21) Заявка № 2018126239/10(041621)

(22) Дата подачи заявки 16.07.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента 16.07.2018

ПРИОРИТЕТ УСТАНОВЛЕН ПО ДАТЕ

(22) подачи заявки 16.07.2018

(72) Автор(ы) Алакин Виктор Михайлович, Никитин Геннадий Сергеевич, Плахов Сергей Александрович, RU

(73) Патентообладатель(и) Алакин Виктор Михайлович, RU, Никитин Геннадий Сергеевич, RU, Плахов Сергей Александрович, RU

(54) Название изобретения КАРТОФЕЛЕКОПАТЕЛЬ РОТАЦИОННЫЙ (ВАРИАНТЫ)

(см. на обороте)

02	2	ДОМ 22.04.2019	102806
		ИЗФ 22.04.2019	

ВНИМАНИЕ! С целью исключения ошибок просьба проверить сведения, приведенные в заключении, т.к. они без изменения будут внесены в Государственный реестр изобретений Российской Федерации, и незамедлительно сообщить об обнаруженных ошибках.

Адрес для переписки с патентообладателем или его представителем, который будет опубликован в официальном бюллетене
--

указан на лицевой стороне бланка решения
--

Адрес для направления патента

указан на лицевой стороне бланка решения
--

В результате экспертизы заявки по существу, проведенной в соответствии со статьей 1386 и пунктом 1 статьи 1387 Гражданского кодекса Российской Федерации, введенного в действие Федеральным законом от 12 марта 2014 г. № 35-ФЗ (далее - Кодекс), в отношении уточненной заявителем формулы изобретения установлено соответствие заявленной группы изобретений требованиям статьи 1349 Кодекса, условиям патентоспособности, установленным статьей 1350 Кодекса, и соответствие документов заявки требованию достаточности раскрытия сущности изобретения, установленному пунктом 2 статьи 1375 Кодекса.

Формула изобретения приведена на странице(ах) 3-5.