

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Калуга – 2019

Работа выполнена в Калужском филиале федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Алакин Виктор Михайлович

Официальные оппоненты: **Рембалович Георгий Константинович**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», заведующий кафедрой технологии металлов и ремонта машин, декан автодорожного факультета;
Остроумов Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, государственное автономное профессиональное образовательное учреждение Иркутской области «Заларинский агропромышленный техникум», преподаватель.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

Защита состоится 05 декабря 2019 г. в 13 ч 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 220.010.04, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ), по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ и на сайте www.vsau.ru («Информация о деятельности диссертационных советов» – «Защиты» – «Д 220.010.04»), а также по ссылке: <http://ds.vsau.ru/?p=7556>.

Автореферат разослан 11 октября 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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, 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. Ремболовича, Г.П. Солодухина, А.А. Сорокина, М.Б. Угланова и 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

картофелеуборочных машин, в том числе в направлении разработки новых сепарирующих устройств ротационного типа.

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

Задачи исследования:

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

Научную новизну работы составляют:

- схема копателя, отличающаяся совмещением рабочих процессов приемного битера 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 в 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 работы имеют: аналитическая зависимость угла наклона выступов ротационного рабочего органа от характеристик почвы и угла захвата картофельного пласта; уравнение динамики, описывающее процесс безотрывного перемещения компонентов картофельного вороха; новое устройство, совмещающее процессы приемного битера и ротационного сепаратора с усовершенствованной формой рабочих органов, совместно обеспечивающих высокую эффек-

тивность сепарации суглинистой почвы при снижении энергоемкости картофелекопателя и повреждаемости клубней; результаты моделирования процессов ротационного устройства для оценки полноты сепарации почвы при изменении режимов работы битера и роторов сепаратора.

Практическая значимость работы заключается: в принципе совмещения в конструкции картофелекопателя усовершенствованных приемного битера и ротационного сепаратора, обеспечивающих высокоэффективную сепарацию почвы при безотрывном перемещении картофельного пласта; в устройстве битера с обрезиненными лопастями и регулируемыи отражающими щитками, повышающем интенсивность приема и разрушения, а также устойчивость подачи пласта на сепаратор без повреждения клубней; в устройстве и параметрах нового ротационного сепаратора, обеспечивающих повышение полноты сепарации суглинистой почвы при снижении энергоемкости, залипания роторов и повреждаемости клубней; в рекомендации по выбору режимов вращения битера и ротационного сепаратора в зависимости от рабочей скорости картофелекопателя в условиях суглинистых почв.

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 на основе положений теоретической механики, начертательной геометрии, сопротивления материалов и положений математического анализа. Обоснование конструктивных и кинематических параметров рабочих органов ротационного типа произведено с использованием результатов исследований сепарирующих устройств и общепринятых методик разработки процессов 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 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, отличающиеся возможностью определения режимов вращения секций с учетом ме-

ста 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 доложены, обсуждены и одобрены на семи научных конференциях «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» Калужского филиала МГТУ имени Н. Э. Баумана в 2013 г., 2014 г., 2015 г., 2016 г., 2018 г., на студенческой конференции «Молодежные инновации – Калужской области» в 2013 г., на научно-практической конференции с международным участием ФГБНУ «Калужский НИИСХ» «Инновационные разработки для развития отраслей сельского хозяйства региона» в 2019 г.

Результаты исследований приняты к внедрению в учебный процесс Российского государственного аграрного университета - МСХА имени К.А. Тимирязева и 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». 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проанализированы предпосылки к научному исследованию и обоснована актуальность выбранной темы. На основе проведенного анализа поставлена цель, сформулированы задачи и научная новизна, определены объекты и предмет научного исследования. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Анализ технологий и средств уборки картофеля» рассматриваются основные технологии и способы уборки картофеля, в том числе машины их реализующие. Большой вклад в изучение процесса сепарации картофельного вороха внесли такие ученые, как В.М. Алакин, В.М. Алесенко, С.Н. Борычев, Я.И. Верменко, В.В. Воронков, А.А. Голиков, Н.Н. Колчин, А.В. Кузьмин, А.Г. Максимов, И.Н. Масленков, С.С. Остроумов, Г.Д. Петров, И.И. Попов, Г.К. Рембалович, А.А. Сорокин, Д.А. Федоров, Н.Н. Якутин и многие другие.

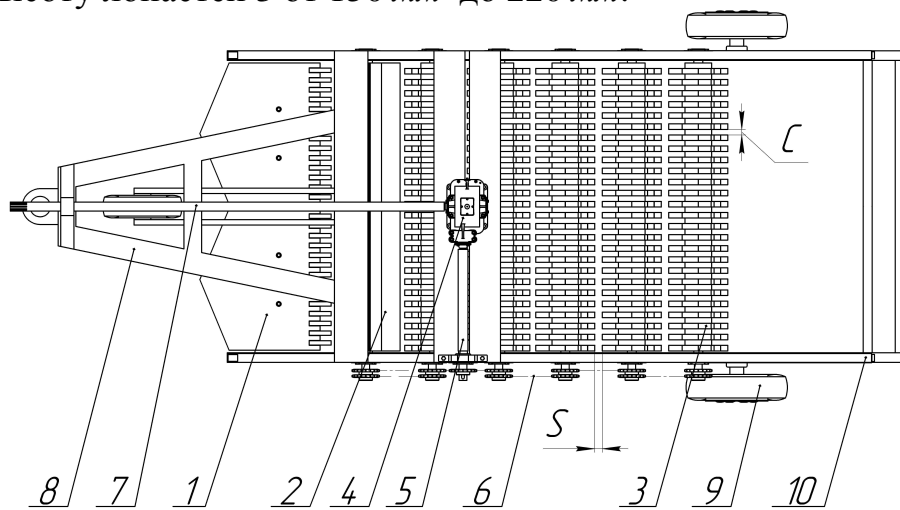
Аналитические исследования наиболее распространенных сепарирующих устройств картофелеуборочных машин показали, что существующие рабочие органы не в достаточной степени обеспечивают эффективность выделения суглинистых почв в сложных почвенно-климатических условиях производства картофеля в Нечерноземной зоне РФ. Установлено, что для данных условий больше всего подходят ротационные сепараторы. Литературный обзор интенсификаторов показал преимущества использования лопастного битера в конструкциях картофелеуборочных машин. За счет особенностей лопастной конструкции и режимов работы обеспечивается возможность его применения в комплексе с ротационными сепарирующими поверхностями.

По результатам проведенных аналитических исследований предложена гипотеза о перспективности совершенствования картофелекопателя путем совмещения в его компоновке усовершенствованных конструкций приемно-подающего лопастного битера и ротационного сепаратора, с целью повышения сепарирующей эффективности и снижения повреждения клубней и энергоемкости устройства.

Во второй главе «Теоретические исследования по обоснованию технологической схемы и параметров основных рабочих органов ротационного картофелекопателя» обосновываются конструктивные параметры и режимы работы ротационного картофелекопателя, отличающегося сочетанием процессов усовершенствованного приемно-подающего битера и нового ротационного сепаратора (рисунок 1).

Предложенный нами ротационный сепаратор состоит из набора параллельно расположенных и вращающихся в одном направлении секций, которые в свою очередь образованы ротационными рабочими органами и распорными втулками. Секции предложили устанавливать друг относительно друга без перекрытия выступов соседних рядов. Такая

компоновка обеспечит возможность смещения роторов для изменения величины сепарирующих просветов C без зацепления выступов соседних секций. В тоже время технологический зазор S между соседними секциями позволит регулировать транспортирующую и сепарирующую способность ротационной рабочей поверхности в зависимости от конкретных почвенно-климатических условий и минимального товарного размера убираемых клубней (рисунок 1). В конструкции четырехлопастного битера нами предложено использовать вал квадратного сечения 1 с кронштейнами 2, на которых закреплены лопасти с резиноканевой поверхностью 3 и отражающие щитки 4 (рисунок 4). В кронштейнах 2 предложили вырезать пазы для крепления и радиального смещения лопастей 3 и отражающих щитков 4, что позволит изменять рабочую высоту лопастей 3 от 150 мм до 220 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 1 – Конструктивная схема картофелекопателя с приемно-подающим битером и ротационным сепаратором

Для обоснования диаметров ротационных рабочих органов и четырехлопастного битера предложили графоаналитическую методику, которая заключается в построении технологической схемы картофелекопателя в масштабе, с указанием параметров подачи пласта, мест размещения и размеров подкапывающих лемехов, битера и роторов (рисунок 2). Для этого приняли базовые параметры подкапывающих лемехов: угол наклона $\alpha=20^\circ$, длину $L=480$ мм и ширину $B_n=580$ мм.

Исходя из предложенной нами схемы (рисунок 2) битер должен принимать картофельный пласт с лемехов и устойчиво подавать его на вершины первого ряда ротационных рабочих органов. Для обеспечения одного уровня перехода пласта на лопасть ось вращения битера расположили на уровне края лемехов. Приняв высоту пласта 120 мм и технологический зазор для просеянной почвы 40 мм получили, что при

данной компоновке рабочих органов вписанный диаметр битера D_{δ} составляет 300 мм. Далее картофельный пласт будет устойчиво перемещаться первой секцией сепаратора при исключении перепада высот траектории подачи битера и поверхности роторов. При этом нижний уровень роторов должен исключать зацепление выступов с просеянной под сепаратором почвой, поэтому графически получаем диаметр роторов $D_p=300$ мм.

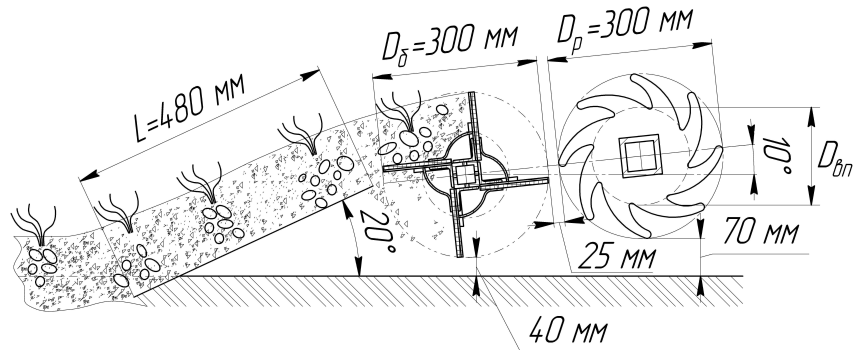


Рисунок 2 – Схема к определению внешних диаметров битера и ротационных рабочих органов

На этапе обоснования угла наклона выступов ротационных рабочих органов предложили воспользоваться условием равновесия для части картофельного пласта, находящегося на выступе ротора второй секции (рисунок 3).

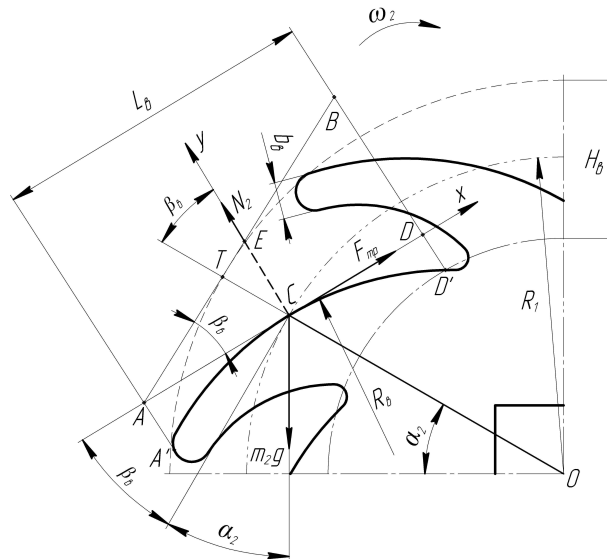


Рисунок 3 – Силы, действующие на часть картофельного пласта, находящегося на выступе ротора второй секции

На данном участке сепаратора перемещается большое количество почвы с клубнями, из-за чего увеличивается вероятность соскальзывания пласта с выступа ротора. Для предотвращения этого угол наклона выступа β_{δ} должен быть равен:

$$\operatorname{tg} \beta_6 = \frac{\cos \alpha_2 - f_p \sin \alpha_2}{f_p \cos \alpha_2 + \sin \alpha_2}, \quad (1)$$

где f_p – коэффициент трения скольжения клубней по резине, $f_p=0,7$;
 α_2 – угол поворота роторов второй секции, градус.

В результате решения (1) был получен угол β_6 равный $28,5^\circ$.

Высоту выступов H_6 ротационных рабочих органов рассчитали по методике предложенной В.М. Алакиным. На основании определенной им зависимости высоты выступов H_6 от их угла наклона β_6 и внешнего диаметра роторов D_p вычислили, что при $\beta_6=28,5^\circ$ и $D_p=300$ мм расчетное значение высоты выступов $H_6=62$ мм. Исходя из этого нашли диаметр основания впадин выступов $D_{en}=176$ мм.

Длину проекции выступов ротационного рабочего органа L_6 определили из треугольника ABD (рисунок 3):

$$L_6 = \frac{H_6}{\sin \beta_6} \quad (2)$$

При решении зависимости (2) получили длину проекции выступов L_6 равную 130 мм.

Радиус скругления выступов R_6 определяли с помощью геометрических построений. Для этого из точек A и D треугольника ABD опустили перпендикуляры AA' и DD' до пересечения с диаметром ротора D_p и диаметром впадин D_{en} (рисунок 3). Затем через получившиеся точки $A'CD'$ провели искомую дугу с радиусом R_6 равным 120 мм.

Для определения высоты вершин выступов ротора b_6 использовали известную зависимость (3):

$$N_{cp} = \frac{3E_p I_6 S_6}{L_6^3}, \quad (3)$$

где E_p – модуль упругости материала ротора, МПа;

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

S_6 – величина прогиба выступа ротора, м;

N_{cp} – средняя нагрузка выступа ротора, Н.

Момент инерции сечения выступа ротора определяется из (4):

$$I_6 = \frac{b_6 B^3}{12}, \quad (4)$$

где b_6 – высота вершин выступов ротора, м;

B – ширина выступа ротора, м.

В результате было получено, что при средних значениях нагрузки пласта почвы $N_{cp}=1300$ Н/м², принятой средней толщине роторов $B=25$ мм и деформации выступа $S_6=2,5$ мм высота выступов ротора $b_6=0,015$ м.

Расчет реального прогиба выступа ротационного рабочего органа S_6 и обоснование его рациональной толщины выполнили с помощью

программы Solidworks Simulation Express. В результате было установлено, что при максимальном значении давления картофельного пласта на поверхность выступа $q' = 1700 \text{ Н/м}^2$ наиболее рациональная толщина ротационного рабочего органа $B = 25 \text{ мм}$, а максимальный расчетный прогиб его выступа S_6 составляет $1,6 \text{ мм}$.

Рациональные режимы работы битера были установлены путем анализа движения части картофельного пласта по его лопасти (рисунок 4). Для этого составили уравнение и спроецировали все силы на ось x :

$$m\ddot{x} = F_y - F_{mp} - mg \sin \beta_c, \quad (5)$$

где m - масса части картофельного пласта, кг;

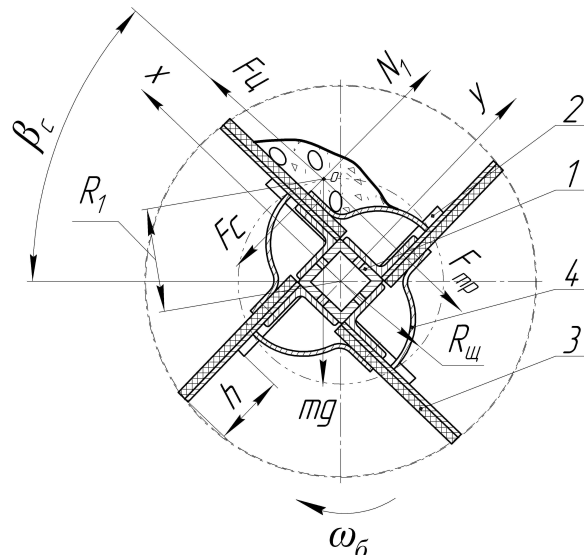
g - ускорение свободного падения, м/с^2 ;

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

F_y - центробежная сила инерции, Н ;

F_{mp} - сила трения скольжения, Н ;

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



1 – вал квадратного сечения, 2 – кронштейн,

3 - резинотканевая лопасть, 4 - отражающий щиток

Рисунок 4 – Схема сил действующих на часть картофельного пласта, перемещаемого битером

В результате получили уравнения определяющие положение части картофельного пласта (6) и скорость ее движения по лопасти битера (7) в зависимости от установленной угловой скорости ω_6 и времени t_6 .

$$x = X_1 + \tilde{x} = C_1 e^{B_1 t_6} + C_2 e^{B_2 t_6} + A \cos \omega_6 t_6 + B \sin \omega_6 t_6 \quad (6)$$

$$\dot{x} = C_1 B_1 e^{B_1 t_6} + C_2 B_2 e^{B_2 t_6} - A \omega_6 \sin \omega_6 t_6 + B \omega_6 \cos \omega_6 t_6 \quad (7)$$

где:

$$A = \frac{fg}{\omega_0^2(1+f^2)}, \quad B = \frac{g(1-f^2)}{2\omega_0^2(1+f^2)},$$

$$C_1 = \frac{B_2(A - R_{uy}) + B\omega_0}{B_1 - B_2}, \quad C_2 = \frac{B_1(R_{uy} - A) + B\omega_0}{B_1 - B_2}$$

Из уравнений (6) и (7) получили угловую скорость бitera ω_0 в пределах от 29 с^{-1} до $35,5 \text{ с}^{-1}$ или частоту вращения $n_0=277\dots339 \text{ мин}^{-1}$.

Обоснование режимов вращения ротационных рабочих органов в зоне интенсивной сепарации проводили с помощью уравнений движения части картофельного пласта, находящегося между выступами роторов первой секции (рисунок 5).

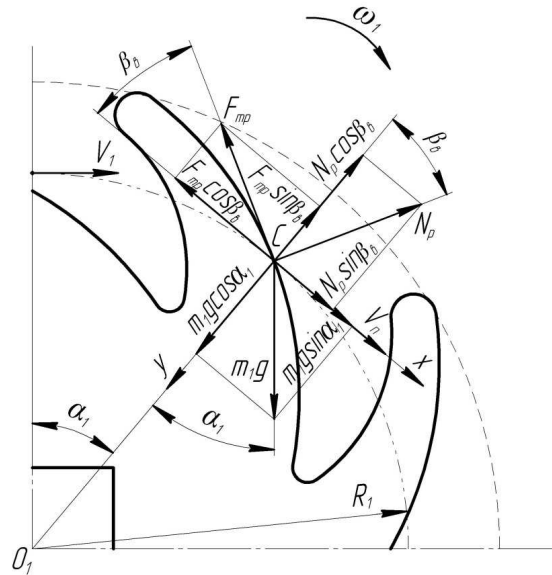


Рисунок 5 – Схема сил, действующих на часть картофельного пласта, находящегося между двумя соседними выступами

Для этого спроецировали на оси x и y силы, действующие на часть картофельного пласта:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 S}{dt^2} = m_1 g \sin \alpha_1 - F_{mp} \cos \beta_0 + N_p \sin \beta_0 \\ \frac{m_1 V_n^2}{R_1} = m_1 g \cos \alpha_1 - F_{mp} \sin \beta_0 - N_p \cos \beta_0 \end{cases} \quad (8)$$

где V_n - скорость движения части картофельного пласта по первой секции сепаратора, м/с ;

S - траектория движения части картофельного пласта;

m_1 - масса части картофельного пласта, кг ;

F_{mp} - сила трения скольжения, Н ;

N_p - сила реакции поверхности выступа ротора, Н ;

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

В результате мы получили уравнение скорости схода части картофельного пласта с роторов первой секции:

$$V_n = \sqrt{V_0^2 + 2R_1g(1 - \cos \alpha_1)}, \quad (9)$$

где α_1 – угол схода пласта с роторов первой секции, градус;

V_0 – начальная скорость картофельного пласта, м/с.

Из уравнения (9) определили, что устойчивое перемещение части картофельного пласта обеспечивается при угловой скорости роторов первой, второй и третьей секций зоны интенсивной сепарации ω_1 от 23 с^{-1} до $27,2 \text{ с}^{-1}$ или частоте вращения n_1 от 220 до 260 мин^{-1} .

Для обоснования режимов вращения ротационных рабочих органов в зоне окончательной очистки составили систему уравнений, определяющих изменение количества движения компонента картофельного вороха при его соударении с поверхностью выступа (рисунок б).

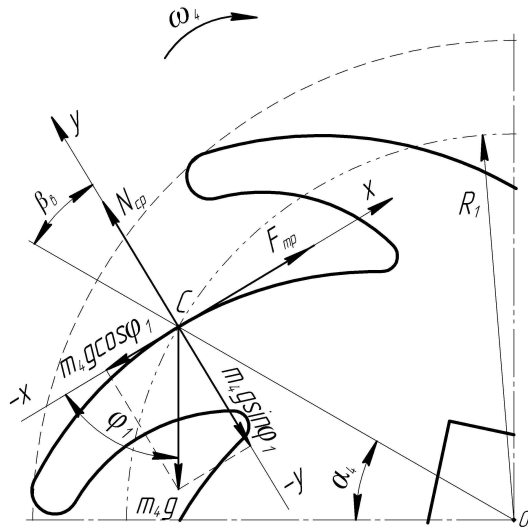


Рисунок б – Схема сил, действующих на компонент картофельного вороха при его соударении с выступом ротационного рабочего органа

Для этого спроецировали на оси x и y силы, действующие на компонент картофельного вороха:

$$\begin{cases} m_4 \tilde{U}_x - m_4 V_x = \int_0^{\tau_y} (F_{mp} - m_4 g \cos \varphi_1) d\tau_y \\ m_4 \tilde{U}_y - m_4 V_y = \int_0^{\tau_y} (N_{cp} - m_4 g \sin \varphi_1) d\tau_y \end{cases} \quad (10)$$

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 ;

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

F_{mp} – сила трения скольжения, H ;

m_4 - масса отдельного компонента картофельного вороха, кг;

τ_y - время соударения, с;

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

α_4 - угол поворота четвертой секции сепаратора, градус.

В результате решения системы (10) были получены уравнения проекций скорости отражения \tilde{U}_x, \tilde{U}_y :

$$\begin{cases} \tilde{U}_x = V_a \cos \psi_n + \omega_4 R_1 \cos \beta_6 + \frac{1}{m_4} F_{mp} \tau_y - g \tau_y \cos \varphi_1 \\ \tilde{U}_y = V_a \sin \psi_n - \omega_4 R_1 \sin \beta_6 + \frac{1}{m_4} N_{cp} \tau_y - g \tau_y \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (11)$$

Из уравнений системы (11) установили, что в зоне окончательной очистки перемещение клубней с минимальным отрывом будет происходить при угловой скорости роторов $\omega_4 = 21 \dots 24 \text{ с}^{-1}$ или частоте вращения $n_4 = 200 \dots 230 \text{ мин}^{-1}$.

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

На первом этапе мы предусматривали исследование устойчивости перемещения картофельного пласта и сепарирующей способности лопастного битера и ротационного сепаратора. При проведении опытов, вначале, выбирали рабочую скорость движения картофелекопателя V_k (1,1; 1,4; 1,7 м/с), а затем устанавливали частоту вращения битера n_b (270; 300; 330 мин⁻¹) и ротационных рабочих органов n_p (200; 230; 260 мин⁻¹). Анализ работы картофелекопателя производили с помощью цифровой видеосъемки путем визуальной оценки устойчивости перемещения картофельного пласта лопастным битером и ротационным сепаратором, особенно в зонах перехода между секциями. Сепарирующую способность оценивали путем анализа фотоснимков на предмет сброса с последней секции сепаратора непросеянных почвенных примесей и потерь клубней под слоем почвы.

На втором этапе экспериментальных исследований планировали определить рациональные режимы работы ротационного картофелекопателя. Опыты осуществлялись по методике проведения многофакторного эксперимента. В качестве критерия оптимизации была выбрана полнота сепарации почвы и других примесей S_c :

$$S_c = \frac{S_u - S_o}{S_u} \quad (12)$$

где S_u - масса почвы и примесей в картофельном пласте, кг;

S_o - масса невыделенных примесей в обработанном пласте, кг.

В качестве основных параметров ротационного картофелекопателя приняли: скорость его работы V_k , частоту вращения битера n_b , частоту

ту вращения ротационных секций n_p . Для каждого из этих факторов было выбрано по два уровня. Верхний уровень соответствовал максимальному, а нижний минимальному значению фактора. Интервалы их варьирования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Условия проведения эксперимента

Уровень	$V_k, м/с$	$n_0, мин^{-1}$	$n_p, мин^{-1}$
Верхний (+)	1,7	330	260
Нулевой (0)	1,4	300	230
Нижний (-)	1,1	270	200

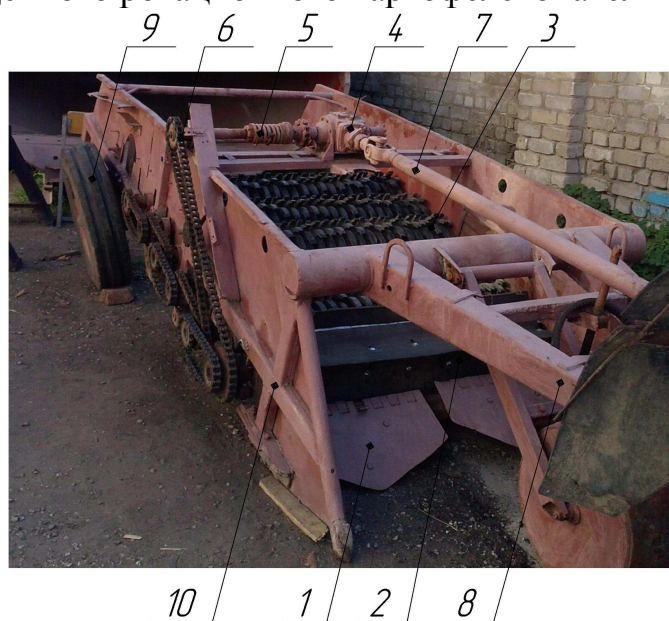
Уравнение регрессии представлено полиномом второго порядка:

$$y = b'_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (13)$$

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

На третьем этапе экспериментальных исследований планировали определить основные эксплуатационные характеристики ротационного картофелекопателя: производительность за 1 час эксплуатационного времени $W_{эк}$, удельный расход топлива трактором МТЗ-80 и повреждение клубней $П_k$.

Для проведения исследований разработали конструкторскую документацию, по которой был изготовлен экспериментальный образец двухрядного прицепного ротационного картофелекопателя (рисунок 7).



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 7 – Общий вид экспериментальной установки

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований в производственно-полевых условиях» приводится анализ результатов экспериментальных исследований ротационного картофелекопателя в производственно-полевых условиях.

Экспериментальные исследования проводились в 2017 и 2018 годах на полевых участках ФГБНУ «Калужский Научно-Исследовательский Институт Сельского Хозяйства». Для проведения опытов были выбраны участки с сортами картофеля «Удача», «Калужский» и «Ред-Скарлетт». Температура воздуха составляла 14...16°C, влажность и твердость почвы равнялись 8,5...11,8% и 0,39...0,44 МПа соответственно. Средняя урожайность достигала 27,5 т/га.

В ходе опытов по исследованию устойчивости перемещения картофельного пласта и сепарирующей способности лопастного бitera и ротационного сепаратора было выявлено, что при скорости движения ротационного картофелекопателя V_k - 1,1; 1,4; 1,7 м/с, частоте вращения бitera $n_b=270 \text{ мин}^{-1}$ и роторов $n_p=200 \text{ мин}^{-1}$ происходит сгуживание подкопанного пласта перед первой ротационной секцией. В зоне интенсивной сепарации компоненты картофельного пласта только частично просеивались в сепарирующие просветы. Это, в свою очередь, привело к увеличению количества не разрушенных почвенных комков в зоне окончательной очистки и в ходе с последней секции ротационного сепаратора.

С увеличением частоты вращения лопастного бitera n_b до 300 мин^{-1} и роторов n_p до 230 мин^{-1} , при скорости движения ротационного картофелекопателя V_k - 1,1; 1,4; 1,7 м/с, повысилась и устойчивость перемещения картофельного пласта на всех его секциях.

Лопастной бiter равномерно принимал, разрушал структуру и устойчиво подавал пласт на вершины первой секции ротационного сепаратора. Анализ фотоснимков показал, что секции интенсивно распределяли картофельный пласт по ширине, перемещали его компоненты без сгуживания и эффективно просеивали почвенные примеси, обеспечивая роторам 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.

При дальнейшем повышении частоты вращения лопастного бitera n_b до 330 мин^{-1} и роторов n_p до 260 мин^{-1} , при скорости движения ротационного картофелекопателя V_k - 1,1; 1,4; 1,7 м/с, наблюдалось чрезмерное динамическое воздействие бitera на подкопанный пласт, что приводило к перебрасыванию почвы с клубнями через первую секцию сепаратора. Ротационные рабочие органы также оказывали значительное динамическое воздействие на компоненты картофельного пласта, что привело к снижению сепарирующей эффективности роторов. Поэтому в

зоне окончательной очистки наблюдалось интенсивное перемещение клубней вместе со значительным количеством не разрушенных почвенных комков и с отрывом от роторов.

В ходе обработки результатов экспериментальных исследований по определению рациональных режимов работы ротационного картофелекопателя было составлено уравнение, описывающее зависимость полноты сепарации примесей S_c (%) от управляемых факторов: скорости работы ротационного картофелекопателя V_k (м/с), частоты вращения битера n_b (мин⁻¹) и частоты вращения ротационных рабочих органов n_p (мин⁻¹).

$$S_c = 149,4V_k + 2,86n_b + 1,45n_p - 57,7V_k^2 - 0,005n_b^2 - 0,003n_p^2 - 626,5 \quad (14)$$

В ходе проведенных экспериментальных исследований было выявлено, что наибольшее влияние на полноту сепарации примесей S_c оказывают скорость движения ротационного картофелекопателя V_k и частота вращения роторов n_p . Из уравнения (14) нашли координаты стационарной точки: $V_k=1,3$ м/с; $n_p=242$ мин⁻¹. Для более подробного изучения интерполяционной формулы построили поверхность отклика и ее контурный график, характеризующие полноту сепарации S_c при изменении факторов V_k , n_p и при постоянном значении фактора n_b (рисунок 8).

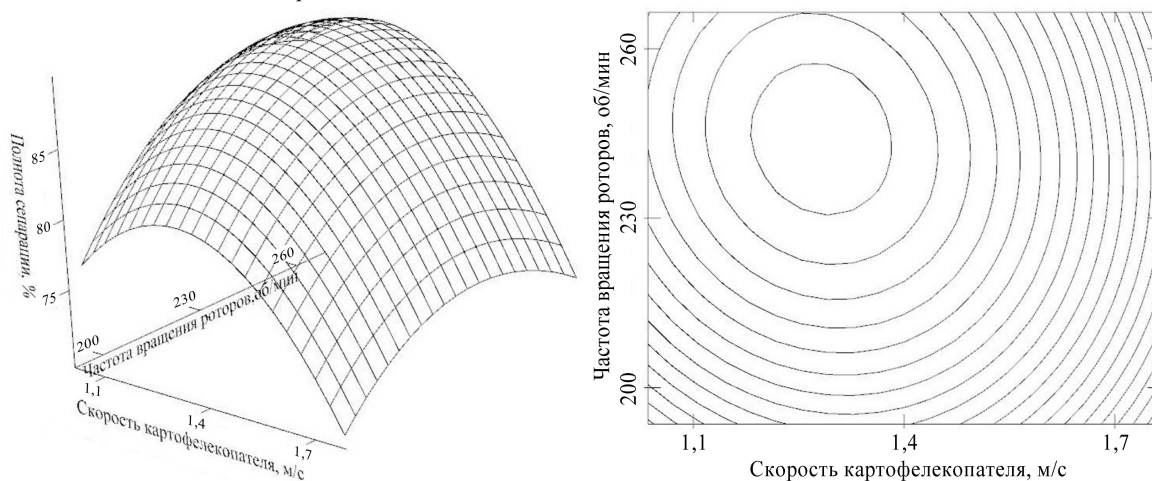


Рисунок 8 – Поверхность отклика и ее контурный график, характеризующие полноту сепарации S_c при изменении факторов V_k , n_p и при постоянном значении фактора n_b

По результатам проведенных экспериментальных исследований была определена зависимость полноты сепарации примесей ротационным картофелекопателем S_c от всех сочетаний основных факторов. Ее максимальное значение (89,7%) достигается при скорости ротационного картофелекопателя $V_k=1,1...1,4$ м/с, при значениях частоты вращения битера $n_b=300...330$ мин⁻¹ и роторов $n_p=230...250$ мин⁻¹.

В результате проведения опытов по определению эксплуатационных характеристик ротационного картофелекопателя были получены

значения его производительности 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%.

В пятой главе «Технико-экономическая оценка применения картофелекопателя ротационного типа» приведено экономическое обоснование целесообразности применения предлагаемого ротационного картофелекопателя. Технико-экономические показатели и годовой экономический эффект определили в результате сравнения его эксплуатационных затрат с эксплуатационными затратами серийного картофелекопателя КСТ-1,4А.

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), увеличивается производительность (0,607 га/ч против 0,484 га/ч), а также обеспечивается более высокий коэффициент использования времени смены (0,86 против 0,8). В итоге было определено, что суммарный годовой экономический эффект от снижения эксплуатационных затрат при использовании ротационного картофелекопателя 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 четырехлопастного 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 $\beta_r=28,5^\circ$, их длину $L_r=130$ мм, радиус скругления $R_r=120$ мм, высоту $H_r=62$ мм, высоту вершин $b_r=15$ мм и количество выступов на роторе $N_r=8$ 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 $n_l=230...260$ 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 $n_b=300...330 \text{ мин}^{-1}$ и роторов $n_p=230...250 \text{ мин}^{-1}$, обеспечивающих полноту сепарации 89,7% при скорости движения картофелекопателя $V_k=1,1...1,4 \text{ м/с}$.

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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Алакин В.М. Картофелекопатель с ротационной сепарирующей поверхностью / В.М. Алакин, Г.С. Никитин // Картофель и овощи. – 2018. - № 5. – С. 32–34.

2. 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.

3. 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.

Статьи в сборниках научных трудов и материалах конференций

4. Алакин В.М. Исследование технологического процесса работы битера в комплексе с роторно-пальцевой сепарирующей поверхностью / В.М. Алакин, С.А. Плахов, Г.С. Никитин // Научно-технические материалы 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.

5. Алакин В.М. Обоснование угловой скорости вращения рабочих органов роторного картофелекопателя / В.М. Алакин, С.А. Плахов, Г.С. Никитин // Научно-технические материалы 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.

6. Алакин В.М. Предпосылки к разработке роторного мини-картофелекопателя / В.М. Алакин, С.А. Плахов, Г.С. Никитин // Научно-технические 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.

7. Алакин В.М. Развитие сепарирующих устройств картофелеуборочных машин / В.М. Алакин, Г.С. Никитин // Научно-технические технологии в приборостроении и машиностроении и развитие 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.

8. Никитин Г.С. Определение кинематических параметров интенсивной зоны сепарации ротационной рабочей поверхности / Г.С. Никитин, В.М. Алакин // Научно-технические технологии в приборостроении и машиностроении и развитие 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.

9. Никитин Г.С. Определение оптимальных параметров и режимов работы лопастного битера / Г.С. Никитин, В.М. Алакин, С.А. Плахов // Научно-технические технологии в приборостроении и машиностроении и развитие 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.

10. 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.

11. Плахов С.А. Обоснование формы пальцев роторов сепаратора картофелекопателя / С.А. Плахов, В.М. Алакин, Г.С. Никитин // Научно-технические 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.

Просим принять участие в работе диссертационного совета Д 220.010.04 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, ученому секретарю. Телефон: (473) 224-39-39, 8-900-924-5638, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.