

На правах рукописи



Нагайка Михаил Андреевич

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ВИБРАЦИОННОГО ГЛУБОКОРЫХЛИТЕЛЯ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства
механизации сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена на кафедре «Технологические машины и технологии машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный аграрный университет».

Научный руководитель: **Щукин Сергей Геннадьевич**,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Технологические
машины и технологии машиностроения»
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
аграрный университет»

Официальные оппоненты: **Яковлев Николай Степанович**,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, главный научный сотрудник, заведующий
лабораторией «Механизация процессов возделывания
зерновых культур» Сибирского научно-
исследовательского института механизации и элек-
трификации сельского хозяйства Сибирского
федерального научного центра агробиотехнологий
Российской академии наук (СибИМЭ СФНЦА РАН)

Мяло Владимир Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Агроинженерии»
ФГБОУ ВО «Омский государственный
аграрный университет имени П.А. Столыпина»

Ведущая организация: Федеральное государственное образовательное
учреждение высшего образования «Алтайский
государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится 8 декабря 2016 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46, тел/факс +7 (3852) 36-71-29, официальный сайт: <http://www.altstu.ru>; электронный адрес: erb_401@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» и на официальном сайте: http://www.altstu.ru/media/f/Dissertaciya_Nagajka-M.A..pdf.

Автореферат разослан « » октября 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор

Куликова Лидия Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Комплексная механизация сельскохозяйственных полевых работ наряду с очевидными достоинствами характеризуется многократными проходами сельскохозяйственной техники по полю, приводящими к уплотнению почвы. Антропогенное переуплотнение почвы сельскохозяйственной техникой приводит к снижению её плодородия в результате ухудшения физико-механических и агрофизических свойств, нарушению водного и воздушного режимов.

Антропогенное переуплотнение почв наиболее ярко выражено в слое 0...0,4 м, активно используемом корневой системой растений. При обработке на такую глубину вспашка не может рассматриваться альтернативой безотвальному рыхлению по причине выноса бесструктурных слоёв на поверхность почвы, приводящего к снижению её плодородия. Известные опыты по разуплотнению переуплотнённых почв путём основной безотвальной обработки показали её низкую эффективность и высокую энергоёмкость.

Одним из перспективных путей повышения качества и энергоэффективности выполнения основной безотвальной обработки является применение вибрационного способа обработки почв. Установлено, что использование вибрации рабочих органов почвообрабатывающих машин при определённых условиях позволяет повысить степень крошения почвы, снизить её плотность, достичь снижения удельных энергозатрат на выполнение обработки. Актуальной практической задачей является обоснование способа основной безотвальной обработки почв на глубину до 0,4 м, позволяющего повысить агротехнические показатели её выполнения при снижении энергетических затрат.

Актуальность работы подтверждается выполнением исследований в рамках федеральной научно-технической программы по заказу Минсельхоза РФ по темам: «Совершенствование технологий и технических средств для возделывания, уборки и послеуборочной обработки сельскохозяйственных культур в земледелии», номер гос. регистрации 01201255159, и «Совершенствование технологий и технических средств для разуплотнения почв использованием энергии вибрации», номер гос. регистрации 115042810041.

Степень разработанности темы. Вопросам технологии вибрационной обработки почв посвящены научные труды многих отечественных учёных, в числе которых А.А. Дубровский, И.И. Бурмин, И.И. Быховский, Г.В. Силаев, Р.М. Зоненберг, Г.Э. Свирский, Л.Ф. Бабицкий, Ш.Е. Кутубидзе, И.Н. Петрягин, А.Б. Коганов, А.П. Швейкин, М.М. Константинов, и другие. За рубежом этой проблемой занимались Н.Р. Harrison (Великобритания), J. G. Hendrick (США), W. F. Buchele (США), R. Tabatabaecoloor (Иран), R. Karoonboonyanan (Тайланд), V.M. Salokhe (Индия), Т. Niyamara (Тайланд), Hiroshi Nakashima (Япония), и многие другие.

Основным направлением большинства проведённых исследований является снижение энергетических затрат на выполнение обработки почвы путём снижения тягового сопротивления рабочих органов за счёт использования энергии вибрации. Проблема повышения качества выполнения основной безотвальной обработки почвы изучена недостаточно полно и требует дальнейших исследований.

Цель исследования – повысить эффективность рабочего процесса глубокорыхлителя за счет совершенствования способа воздействия рабочих органов на почвенную структуру путем использования энергии вибрации.

Задачи исследований:

- провести теоретические исследования рабочего процесса инерционного вибровозбудителя планетарного типа и обосновать его параметры;
- провести лабораторные исследования режимов работы вибровозбудителя для проверки достоверности результатов теоретических исследований;
- провести полевые исследования режимов работы вибрационного глубокорыхлителя с целью установления закономерностей изменения качественных показателей выполнения основной безотвальной обработки почвы;
- оценить технико-экономическую эффективность использования вибрационного глубокорыхлителя в производственных условиях.

Объект исследования – процесс обработки почвы рабочими органами глубокорыхлителя, передающими энергию вибрации.

Предмет исследования – закономерности изменения агротехнических показателей обработки почвы от воздействия энергии вибрации, передаваемой рабочими органами глубокорыхлителя.

Научная новизна.

1. Получены математические зависимости, описывающие преобразование энергии инерционным вибровозбудителем планетарного типа.

2. Обоснованы параметры инерционного вибровозбудителя планетарного типа, обеспечивающие его максимальную эффективную мощность. Новизна технических решений подтверждена патентом на изобретение.

3. В результате полевых экспериментов получены зависимости между интенсивностью воздействия на почву энергии вибрации, передаваемой через рабочие органы глубокорыхлителя, и агротехническими показателями выполнения основной безотвальной обработки почвы.

Практическая значимость.

1. Получены математические зависимости, позволяющие расчётным путём определить параметры вибровозбудителя при проектировании вибрационных машин.

2. Изготовлен экспериментальный образец вибрационного глубокорыхлителя ГВ-1,8, производственные испытания которого показали, что на рабочей скорости 2,5 м/с достигается снижение глыбистости на 18%, гребнистости на 9,5%, сохранение стерни повышается на 29%. Плотность обработанной почвы снижается с 1,19 до 1,02 г/см³, коэффициент структурности почвы в слое 0...0,4 м возрастает с 0,249 до 0,380. Установлено, что использование энергии вибрации рабочих органов глубокорыхлителя на скорости 2,5 м/с позволяет снизить их тяговое сопротивление на 14,38%, повысив за счёт этого производительность машинно-тракторного агрегата на 11,2%.

Методология и методы исследований. Теоретические исследования выполнены с использованием законов теоретической механики, теории машин и механизмов, математического анализа. Лабораторные исследования проводились с использованием лабораторной модели вибрационной почвообрабатывающей машины на основе планирования многофакторного эксперимента с помощью

серийных измерительных приборов по общеизвестным методикам. Полевые исследования проводились с использованием экспериментального образца вибрационного глубокорыхлителя на основе планирования многофакторного эксперимента. Оценка качества обработки почвы проводилась по методикам, изложенным в действующих ГОСТах. Результаты экспериментов обработаны методами математической статистики с помощью ПК.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Математические зависимости вынуждающей силы, эффективной мощности и амплитуды возбуждаемых вибровозбудителем колебаний от его параметров.

2. Параметры вибровозбудителя, обеспечивающие его максимальную эффективную мощность.

3. Зависимости агротехнических показателей работы глубокорыхлителя от интенсивности воздействия на почву энергии вибрации, передаваемой через его рабочие органы.

Достоверность результатов работы. Достоверность основных положений и выводов подтверждается использованием современной контрольно-измерительной и вычислительной техники, соблюдением методик, изложенных в действующих ГОСТах и ОСТАх, заключениями аккредитованной лаборатории, статистической обработкой экспериментальных данных, согласованностью теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследований по теме диссертационной работы доложены и одобрены на: Международной научно-технической конференции «Модернизация сельскохозяйственного производства на базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем» (г. Москва, 2012 г.); Научно-практической конференции аспирантов и соискателей НГАУ «Инновационные подходы в решении проблем АПК» (г. Новосибирск, 2013 г.); Международной научно-практической конференции «Научные исследования и разработки к внедрению в АПК» (г. Иркутск, 2013 г.); Международной научно-практической конференции «Наука в современном информационном обществе» (г. Москва, 2013г.); Всероссийской научно-практической конференции «Молодежь в аграрной науке и образовании» (г. Новосибирск, 2013г.); Международной научно-практической конференции «Совершенствование конструкции, эксплуатации и технического сервиса автотракторной и сельскохозяйственной техники» (г. Уфа, 2013 г.); Региональной научно-практической конференции молодых учёных Сибирского федерального округа «Актуальные проблемы развития АПК в работах молодых учёных Сибири» (г. Новосибирск, 2015 г.); Международной научно-практической конференции "Информационные технологии, системы и приборы в АПК" (г. Новосибирск, р.п. Краснообск, 2015 г.).

Проект вибрационного глубокорыхлителя был удостоен диплома первой степени в номинации «Технические науки» второго этапа Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди аспирантов и молодых учёных ВУЗов Минсельхоза РФ (г. Красноярск, 2012 г.). Результаты производственных испытаний экспериментального глубокорыхлителя были продемонстрированы на дне поля Новосибирской области (г. Новосибирск, с. Алексеевка, 2015 г.).

Реализация результатов исследования. Производственные испытания экспериментального образца ГВ-1,8 в ГНУ СибФТИ Россельхозакадемии и ГНУ СибНИИ кормов Россельхозакадемии показали эффективность его использования для разуплотнения почв на участках с стерновым агрофоном и агрофоном многолетних трав, подвергшихся антропогенному переуплотнению. Результаты НИР внедрены в учебный процесс Инженерного института ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 12 печатных работах, из них 5 в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ. По результатам проведённых исследований получен патент на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Список использованной литературы содержит 115 наименований, в т. ч. 28 на иностранном языке. Работа изложена на 171 странице, содержит 67 рисунков, 16 таблиц и 12 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследований, объект и предмет исследований, научная новизна, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация полученных результатов, структура и объём диссертационной работы.

В первой главе описано рациональное состояние почвы, позволяющее обеспечивать максимальную продуктивность сельскохозяйственных культур. На основании данных исследований, проведённых в РФ, США, Канаде, ФРГ, Великобритании, Молдавии, обобщены сведения о современной проблеме антропогенного переуплотнения почвы, приводящего к ухудшению её физико-механических и агрофизических свойств, приводящего к существенному снижению урожайности возделываемых культур. При современном уровне уплотняющего воздействия на почву сельскохозяйственной техникой, единственным способом устранения его влияния является механическая обработка. Антропогенное переуплотнение почв наиболее сильно выражено в слое почвы 0...0,4 м, наиболее интенсивно используемом корневой системой полевых культур. Среди используемых способов обработки почв на такую глубину наиболее рациональным является безотвальное рыхление.

Анализ имеющихся сведений о механизме воздействия энергии вибрации рабочих органов на почвенную структуру показал возможность его использования для устранения избыточного уплотнения почв и повышения качества выполнения механической обработки.

На основании анализа литературных источников установлено, что для реализации эффективного режима работы вибрационных почвообрабатывающих орудий с заданными характеристиками колебаний рабочих органов, целесообразно использовать инерционные вибровозбудители планетарного типа. По данным аналитического обзора литературных источников сформулированы выводы, цель и задачи исследований.

Во второй главе описано предлагаемое конструктивное устройство инерционного вибровозбудителя планетарного типа. Вибровозбудитель состоит из

корпуса 1 диаметром D (рисунок 1), внутри которого расположено ведущее звено вал-роотор 2, радиусом b , смещённое относительно геометрического центра корпуса 1 на расстояние e .

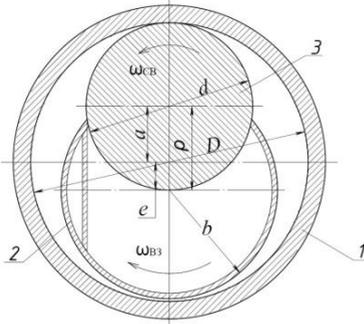


Рисунок 1 – Конструктивная схема вибровозбудителя: 1 – корпус вибровозбудителя; 2 – ведущее звено; 3 – бегунок

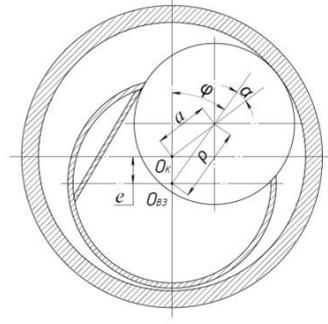


Рисунок 2 – Расчётная схема для определения радиус-вектора ρ движения бегунка

В корпусе размещается бегунок 3 диаметром d , обладающий массой m , свободно перемещающийся относительно рабочей поверхности ведущего звена. При этом центр бегунка находится на расстоянии a от центра корпуса. Вибровозбудитель работает следующим образом. При постоянной угловой скорости ведущего звена 2 $\omega_{вз}$ под действием центробежной силы бегунок 3 прижимается к внутренней поверхности корпуса 1, по которой обкатывается с собственной угловой скоростью $\omega_{св}$, одновременно перемещаясь относительно рабочей поверхности ведущего звена. При этом бегунок движется по внутренней поверхности корпуса с переменным радиус-вектором ρ относительно центра ведущего звена. Вращение неуравновешенной массы внутри корпуса вызывает его колебания, передаваемые через жёстко закреплённые рабочие органы.

Из расчётной схемы (рисунок 2) получено выражение определяющее величину радиус-вектора ρ :

$$\rho = e \cdot \cos \varphi + \sqrt{a^2 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}, \text{ м}, \quad (1)$$

где e – эксцентриситет ведущего звена, м; a – расстояние от центра корпуса до центра бегунка, м; φ – угол поворота ведущего звена, рад.

Кинетическая энергия бегунка, выполненного в виде сплошного цилиндра, при его вращении вокруг центра ведущего звена определяется выражением:

$$E_K = \frac{m \cdot \omega_{вз}^2 \cdot \left(\rho^2 + e^2 \cdot \left(-\sin(\omega_{вз} \cdot t) - \frac{\cos(\omega_{вз} \cdot t) \cdot \sin(\omega_{вз} \cdot t)}{\sqrt{\mu^2 - \sin^2(\omega_{вз} \cdot t)}} \right)^2 \right)}{2} + \frac{m \cdot \rho^2 \cdot \omega_{вз}^2}{4}, \text{ Дж}, \quad (2)$$

где m – масса бегунка, кг; $\omega_{вз}$ – угловая скорость вращения ведущего звена, рад/с, μ – конструктивный коэффициент ($\mu = a / e$).

При движении бегунка от $\varphi=0$ до $\varphi=2\pi$ кинетическая энергия движения бе-

гунка относительно ведущего звена изменяется от E_{Kmax} до E_{Kmin} , т.е. совершается работа. Работа бегунка, выполняемая за один цикл, определяется выражением:

$$A_{ц} = 2 \cdot m \cdot e \cdot a \cdot \omega_{вз}^2, \text{ Дж.} \quad (3)$$

При прочих равных конструктивных параметрах величина работы бегунка за один цикл может изменяться за счёт изменения эксцентриситета ведущего звена. Для определения максимально возможной работы за цикл необходимо определить возможный диапазон изменения эксцентриситета ведущего звена e . Для установления рациональных соотношений между конструктивными параметрами вибровозбудителя определим наиболее выгодную точку контакта бегунка с ведущим звеном.

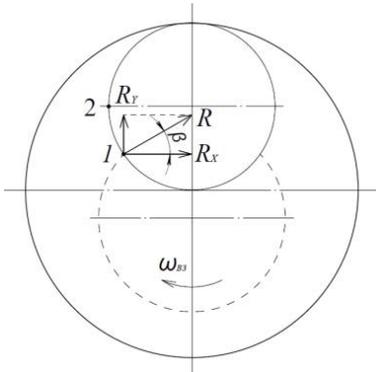


Рисунок 3 – Расчётная схема для определения точки контакта бегунка с ведущим звеном: R – реакция между бегунком и ведущим звеном; R_x , R_y – горизонтальная и вертикальная составляющие силы R

Рассмотрим расчётную схему, представленную на рисунке 3. Реакцию R между бегунком и ведущим звеном можно разложить на горизонтальную R_x и вертикальную R_y составляющие. Горизонтальная часть реакции R_x направлена на приведение бегунка в движение, т.е. на рабочий процесс, а вертикальная R_y направлена на сжатие бегунка и изгиб ведущего звена. Условие максимизации R_x и минимизации R_y выполняются при $\beta=0$ рад. Угол β будет минимальным при контакте ведущего звена и бегунка в точке 2 (рисунок 3). При соблюдении введённого ограничения, максимальная величина эксцентриситета достигается при следующих соотношениях конструктивных параметров:

$$\frac{e}{D} \approx 0,085, \frac{d}{D} \approx 0,568, \frac{a}{D} \approx 0,207, \frac{b}{D} \approx 0,414. \quad (4)$$

Для определения величины вынуждающей силы, создаваемой вибровозбудителем, рассмотрим схему сил, действующих на его конструктивные элементы (рисунок 4).

Установлено, что сила трения скольжения $F_{ТС}$ превышает величину силы трения качения $F_{ТК}$ при любом положении бегунка. В таком случае происходит чистое качение бегунка по внутренней поверхности корпуса.

Полная реакция корпуса $R_{КОРП}$ по величине равна вынуждающей силе $F_{ВЫН}$, создаваемой вибровозбудителем. Поскольку сила трения качения весьма мала, ей можно пренебречь. Тогда величина вынуждающей силы определяется выражением:

$$F_{ВЫН} = F_r^H + F_e^H \cdot \cos(\alpha) - G \cdot \cos \varphi + F_{ДВ} \cdot \cos(90 - \tau), \text{ Н.} \quad (5)$$

$$N_B = N_{\Omega} + N_{МП}, \text{ Вт}, \quad (7)$$

где N_{Ω} – эффективная мощность, затрачиваемая на выполнение рабочего процесса, Вт; $N_{МП}$ – мощность механических потерь, Вт.

Поскольку сила трения в точке контакта с ведущим звеном весьма мала, можно сделать допущение, что силы трения работы не совершают. Тогда эффективную мощность вибровозбудителя можно определить как произведение цикловой работы бегунка на частоту циклов:

$$N_{\Omega} = A_{Ц} \cdot \nu, \text{ где} \quad (8)$$

ν – угловая частота вращения ведущего звена [с^{-1}].

Для вибровозбудителя, обладающего обоснованными соотношениями конструктивных параметров и оснащённого бегунком в виде сплошного цилиндра, эффективная мощность определяется выражением:

$$N_{\Omega} = 16,28 \cdot m \cdot r^2 \cdot \nu^3, \text{ Вт}. \quad (9)$$

В третьей главе представлены программа и методика экспериментальных исследований. Для проведения лабораторных исследований разработан инерционный вибровозбудитель планетарного типа (рисунок 5).

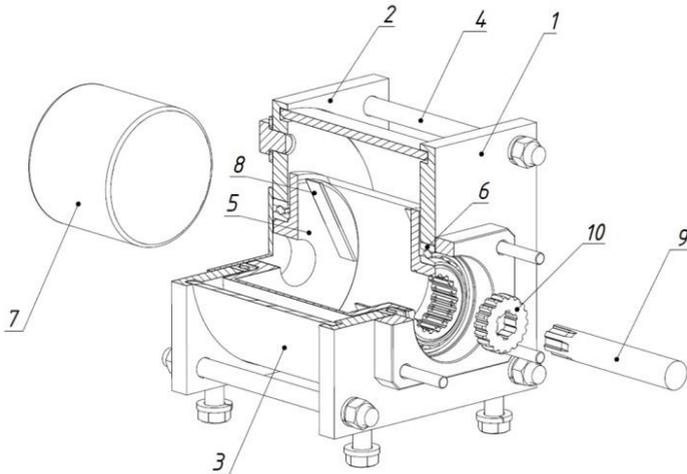


Рисунок 5 – Конструктивное устройство инерционного вибровозбудителя планетарного типа: 1 – плита фронтальная; 2 – плита тыловая; 3 – труба;

4 – шпилька; 5 – ротор; 6 – подшипник; 7 – бегунок; 8 – направляющая ротора; 9 – вал шлицевой; 10 – шестерня приводная

Для практического исследования режимов работы вибровозбудителя сконструирована лабораторная модель вибрационной почвообрабатывающей машины (ЛМВПМ) (рисунок 6).

Основными факторами, влияющими на амплитудно-частотный режим механических колебаний ЛМВПМ, избраны величина вынуждающей силы, частота воздействия вынуждающей силы, масса колебательной системы. Уровни варьирования факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов при проведении эксперимента

Фактор	Высокий уровень (ВУ)	Средний уровень (СУ)	Низкий уровень (НУ)
X1 – масса бегунка, кг	9,1	6,825	4,55
X2 – частота вращения ротора вибровозбудителя, с ⁻¹	15,67	9,4	3,13
X3 – масса установки с балластом, кг	480	320	160

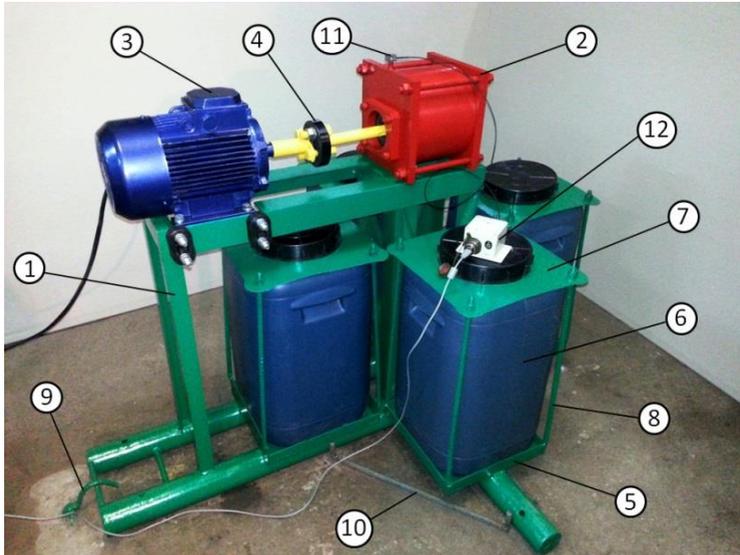


Рисунок 6 – Устройство лабораторной модели вибрационной почвообрабатывающей машины: 1 – рама, 2 – вибровозбудитель, 3 – электродвигатель, 4 – гибкая муфта, 5 – платформа, 6 – ёмкость с балластом, 7 – крышка, 8 – стойка, 9 – крюк, 10 – упор, 11 – виброизмерительный преобразователь АР38, 12 – автономный датчик мониторинга вибрации АДМВ-0,5

При проведении экспериментов величина вынуждающей силы изменялась установкой в вибровозбудитель бегунков различной массы. Частота вращения ротора вибровозбудителя изменялась регулировкой частоты вращения электропривода с помощью частотного преобразователя Delta. Установившаяся частота вращения ротора вибровозбудителя фиксировалась с помощью бесконтактного тахометра АТТ-6020 (рисунок 7).

Масса ЛМВПМ варьировалась изменением количества ёмкостей с балластом и степенью их заполнения. Характеристики переменного тока питания электродвигателя определяли цифровым мультиметром «Fluke 179». Амплитуда колебаний ЛМВПМ регистрировалась акселерометром АР38. Для преобразования аналогового сигнала акселерометра в цифровой вид и передачи его на ПК использовался автономный датчик мониторинга вибрации АДМВ-0,5. Для работы с полученными данными использована программа ADMV Explorer, позволяющая записывать и обрабатывать полученные данные на ПК.

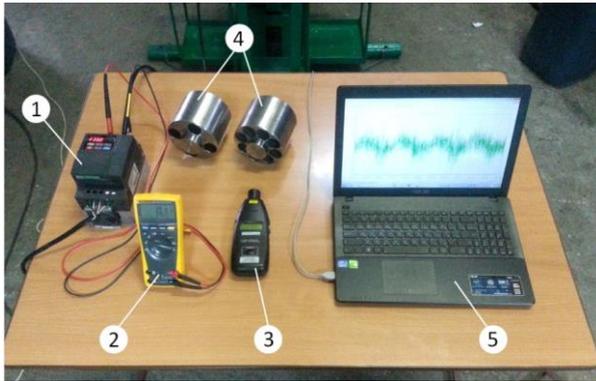


Рисунок 7 – Лабораторный приборно-измерительный комплекс:

1 – частотный преобразователь Delta, 2 – цифровой мультиметр Fluke 179, 3 – бесконтактный тахометр АТТ-6020, 4 – сменные бегунки, 5 – ПК

При планировании многофакторного эксперимента был избран симметричный квази-D-оптимальный план №32, отличающийся высокими суммарными характеристиками при небольшом числе опытов. Повторность проведения опытов пятикратная.

Для проведения полевых исследований изготовленного экспериментального образца вибрационного глубокорыхлителя с шириной захвата 1,8 м, агрегируемого с трактором тягового класса 30 кН (класс Т4 по классификации ТР ТС 031/2012) (рисунок 8).

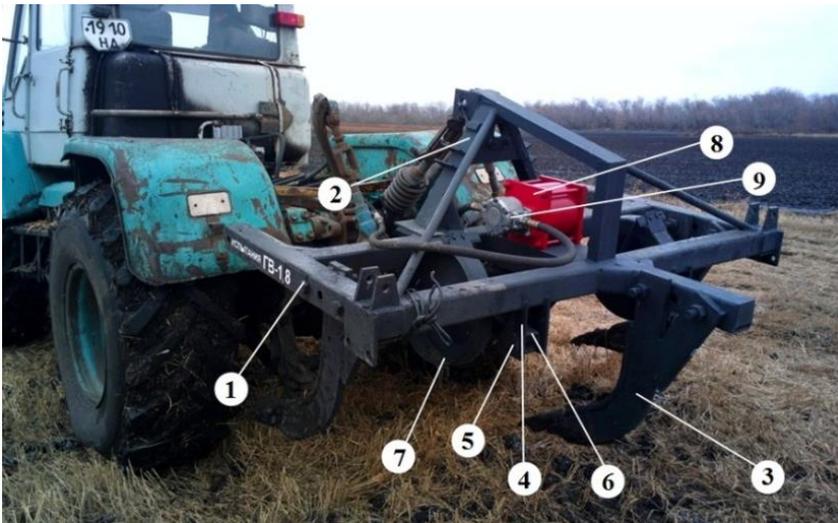


Рисунок 8 – Экспериментальный образец вибрационного глубокорыхлителя ГВ-1,8: 1 – основная рама, 2 – навеска, 3 – рыхлительная лапа; 4 – кронштейн, 5 – палец, 6 – дополнительная рама, 7 – опорное колесо, 8 – вибровозбудитель, 9 – гидромотор

Глубокорыхлитель вибрационный ГВ-1,8 состоит из основной рамы 1, на которой закреплены навеска 2 и рыхлительные лапы 3, прикреплённые к основной раме с шагом 0,9 м. К кронштейнам 4, закреплённым на основной раме 1, с помощью пальцев 5 крепится дополнительная рама 6, имеющая пальцы для крепления к боковым тягам навески трактора. Опорные колёса 7 закреплёны на дополнительной раме 6. В центральной части основной рамы закреплён вибровозбудитель 8 с приводом от гидромотора 9.

Амплитуда колебаний рабочих органов варьировалась в диапазоне от 1 до $4,5 \cdot 10^{-3}$ м, при частоте вращения ротора вибровозбудителя $14,17 \pm 0,17 \text{ с}^{-1}$. Изменение амплитуды колебаний осуществлялось путем установки в вибровозбудитель бегунков разной массы. Фактическая амплитуда колебаний глубокорыхлителя определялась с помощью лабораторного приборно-измерительного комплекса на стационаре. Скорость движения МТА изменялась от 0,83 до 2,5 м/с.

Уровни варьирования факторов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Уровни варьирования факторов

Интервал варьирования и уровни факторов	Управляемые факторы	
	Масса бегунка, кг	Скорость движения, м/с
Нулевой уровень $x_i=0$	6,825	1,67
Интервал варьирования Δx_i	2,275	0,83
Нижний уровень $x_i=-1$	4,55	0,83
Верхний уровень $x_i=+1$	9,1	2,5
Кодирование фактора	X_1	X_2

Для проведения полевых опытов выбран несимметричный трёхуровневый план, № 12. В качестве функции отклика определяли агрофизические свойства обработанной почвы: плотность, влажность, гребнистость, глыбистость поверхности, агрегатный состав, в соответствии с ГОСТ 20915-2011 «Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний». Анализ почвенных проб проводился в аккредитованной лаборатории современных проблем экспериментальной агрохимии Новосибирского государственного аграрного университета. Эксплуатационные и энергетические показатели работы вибрационного глубокорыхлителя определялись в соответствии с ГОСТ Р 52777-2007 «Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки» и ГОСТ Р 52778-2007 «Испытания сельскохозяйственной техники. Методы эксплуатационно-технологической оценки».

В четвёртой главе изложены результаты лабораторных и полевых исследований, технико-экономическая оценка использования вибрационного глубокорыхлителя в производственных условиях.

В результате лабораторных исследований получено уравнение регрессии амплитуды вертикальных колебаний ЛМВПМ от массы бегунка, частоты вращения ротора вибровозбудителя и её собственной массы:

$$Y = 2,33 + 0,0937 \cdot X_1^2 + 0,0487 \cdot X_2^2 + 0,841 \cdot X_3^2 + 1,548 \cdot X_1 + 1,583 \cdot X_2 - 1,432 \cdot X_3 + 1,127 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,61 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,715 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (10)$$

Анализ уравнения регрессии показал, что все выбранные факторы являются значимыми и оказывают существенное влияние на функцию отклика. Коэффициенты уравнения регрессии свидетельствуют о возрастании амплитуды колеба-

ний с увеличением массы бегунка и частоты вращения ротора вибровозбудителя, в то время как увеличение массы ЛМВПМ приводит к её снижению.

Практическое определение мощности, затрачиваемой вибровозбудителем на выполнение рабочего процесса, подтвердило правильность результатов теоретических исследований. На рисунке 9 представлен график зависимости мощности вибровозбудителя от частоты вращения ротора.

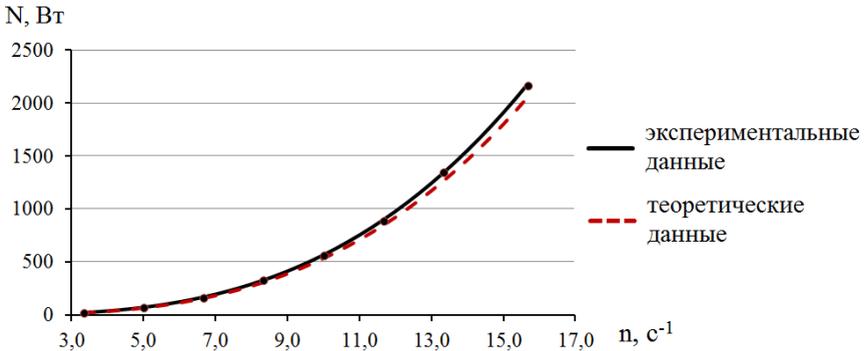


Рисунок 9 – График зависимости мощности вибровозбудителя от частоты вращения ротора

Изучение поверхности почвы, обработанной ГВ-1,8 в различных режимах работы показало существенное различие полученных качественных показателей. Для оценки поверхности обработанной почвы использовались три неразрывных показателя: сохранение стерни, глыбистость и гребнистость поверхности поля. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Агротехнические показатели обработки почвы при различных режимах работы ГВ-1,8

Режим работы ГВ-1,8			Агротехнические показатели		
Масса бегунка, кг	Скорость движения, м/с	Амплитуда колебаний расчётная, 10^{-3} м	Глыбистость, %	Гребнистость, %	Сохранение стерни, %
контроль*	2,5	-	26	21	52
4,55	2,5	1,06	21	20,5	56
4,55	0,83	1,06	14	18	68,5
9,1	2,5	4,53	8	11,5	81
9,1	0,83	4,53	3	8	92

* вариант использования ГВ-1,8 без подключения вибровозбудителя

По сравнению с контролем (обработкой без подключения вибровозбудителя), использование ГВ-1,8 с бегунком массой 9,1 кг на скорости 2,5 м/с позволяет повысить сохранение стерни с 52 до 81%, снизить гребнистость поверхности поля с 21 до 11,5%, глыбистость с 26 до 8%. Также было установлено, что вибрация рабочих органов практически исключает налипание почвы на стойки. При работе на переувлажнённых участках процесс самоочищения стоек от налипшей почвы протекает интенсивно, исключая их забивание.

В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии сохранения стерни (Cc), глыбистости поверхности поля (Γ) и её гребнистости (Γp) от массы бегунка вибровозбудителя (X_1) и скорости движения МТА (X_2):

$$Cc = 74,375 + 12,125 \cdot X_1 - 5,875 \cdot X_2 + 0,375 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (11)$$

$$\Gamma = 11,5 - 6 \cdot X_1 + 3 \cdot X_2 - 0,5 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (12)$$

$$\Gamma p = 14,5 - 4,75 \cdot X_1 + 1,5 \cdot X_2 + 0,25 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad \text{где} \quad (13)$$

X_1 – масса бегунка вибровозбудителя;

X_2 – поступательная скорость движения МТА.

Анализ полученных уравнений регрессии показывает, что выбранные факторы являются значимыми и существенно влияют на функции отклика. Увеличение массы бегунка (и амплитуды колебаний рабочих органов) приводит к повышению качества обработки почвы, т.е. к повышению степени сохранения стерни, снижению гребнистости и глыбистости поверхности поля. Увеличение скорости движения МТА оказывает противоположный эффект. При этом во всех полученных уравнениях большее влияние на функции отклика оказывает масса бегунка, меньшее – скорость движение МТА.

Для комплексной оценки структуры обработанной почвы, по результатам опытов определён коэффициент структурности. Графики зависимости коэффициента структурности обработанной почвы от управляемых факторов приведены на рисунке 10.

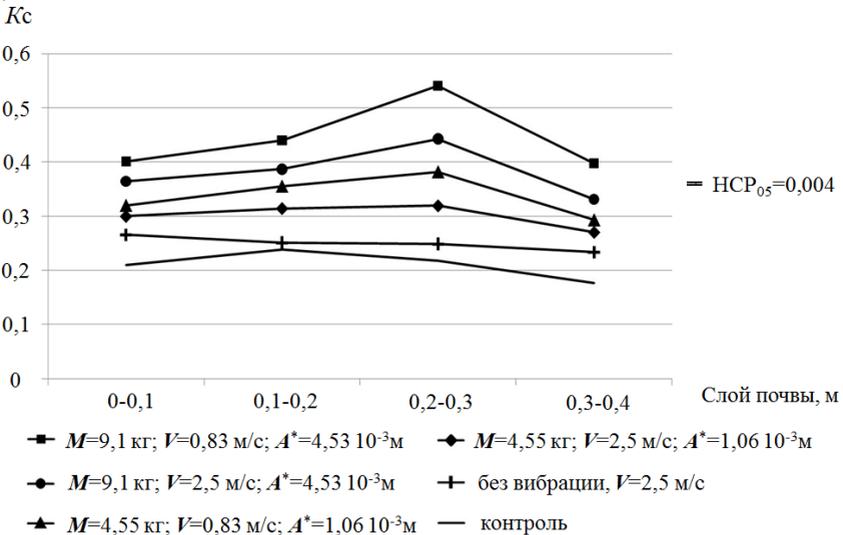


Рисунок 10 – Графики зависимости коэффициента структурности обработанной почвы K_c от массы бегунка M и поступательной скорости движения агрегата V ; A^* – амплитуда колебаний рабочих органов, определённая на стационаре

Регрессия коэффициента структурности обработанной почвы в слое 0 ... 0,4 м от массы бегунка вибровозбудителя и скорости движения МТА описывается уравнением:

$$Y = 0,3658 + 0,047 \cdot X_1 - 0,025 \cdot X_2 - 0,0066 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (14)$$

Установлено, что возрастание массы бегунка (и амплитуды колебаний рабочих органов) приводит к повышению коэффициента структурности, увеличение скорости движения МТА приводит к его снижению. Агрегатный состав обработанной почвы в слое 0...0,4 м приведён в таблице 4.

Оснащение вибровозбудителя бегунком массой 9,1 кг на скорости 2,5 м/с позволяет значительно повысить степень крошения почвы по сравнению с результатами работы в режиме без вибрации. Количество глыб размером 50...100 10⁻³ м снижается более чем в два раза (таблица 4).

Важно подчеркнуть, что в сравнении с обычным глубоким рыхлением, воздействие энергии вибрации избирательно разрушает крупные почвенные агрегаты размером 20...100 10⁻³ м, крошение которых приводит к образованию агрономически ценных фракций. Мелкие фракции размером 0,25...10 10⁻³ м, напротив, не подвергаются разрушению, о чём свидетельствует снижение содержания пылевидных частиц с 0,45% до 0,38% (таблица 4). Такое избирательное воздействие на элементы почвенной структуры позволяет комплексно повысить качество выполнения основной безотвальной обработки за счёт одновременного снижения глыбистости и распыления почвы. В наших опытах это позволило достичь коэффициента структурности почвы Кс в слое 0...0,4 м на уровне 0,38.

Таблица 4 – Агрегатный состав обработанной почвы в слое 0...0,4 м, в процентах

Режим работы ГВ-1,8	Размер почвенных агрегатов, 10 ⁻³ м										
	50-100	20-50	10-20	7-10	5-7	3-5	2-3	1-2	0,5-1	0,25-0,5	менее 0,25
Контроль*	41,51	24,69	12,36	4,59	3,83	2,69	4,25	4,79	0,49	0,44	0,30
Без вибрации	29,58	30,43	14,57	4,56	4,23	3,49	4,84	6,80	0,54	0,51	0,45
4,55/0,83**	16,94	27,53	21,32	6,35	5,42	4,39	6,56	9,89	0,61	0,54	0,40
4,55/2,5**	19,43	28,51	21,51	5,57	4,92	3,88	5,88	8,77	0,53	0,51	0,43
9,1/0,83**	8,675	26,46	19,90	8,09	6,57	4,91	8,54	15,07	0,70	0,73	0,30
9,1/2,5**	12,41	26,53	22,51	8,00	5,62	4,20	7,31	11,62	0,67	0,69	0,38

* агрегатный состав почвы в слое 0...0,4 м до прохода ГВ-1,8,

** приведены: масса бегунка, кг / скорость движения орудия, м/с.

В результате анализа экспериментальных данных получено уравнение регрессии плотности почвы в слое 0...0,4 м, обработанной глубокорыхлителем ГВ-1,8, от массы бегунка вибровозбудителя и поступательной скорости движения МТА:

$$Y = 1,065 - 0,0778 \cdot X_1 + 0,0218 \cdot X_2 + 0,011 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (15)$$

Установлено, что плотность обработанной почвы снижается с увеличением массы бегунка, сопровождающимся ростом амплитуды колебаний рыхлительных лап. Повышение скорости движения МТА приводит к снижению эффекта от вибрации рабочих органов. На рисунке 11 представлены графики зависимости плотности почвы от массы бегунка и поступательной скорости движения агрегата.

При работе ГВ-1,8 с бегунком массой 9,1 кг на скорости 2,5 м/с плотность почвы в слое 0...0,4 м составила 1,02 г/см³. Снижение скорости движения до 0,83 м/с позволило добиться плотности почвы в слое 0...0,4 м равной 0,95 г/см³. Учитывая трехкратное различие в скорости движения МТА и разницу плотности обработанной почвы в 0,07 г/см³, наиболее рациональным стоит признать режим работы ГВ-1,8 с бегунком массой 9,1 кг на скорости 2,5 м/с.

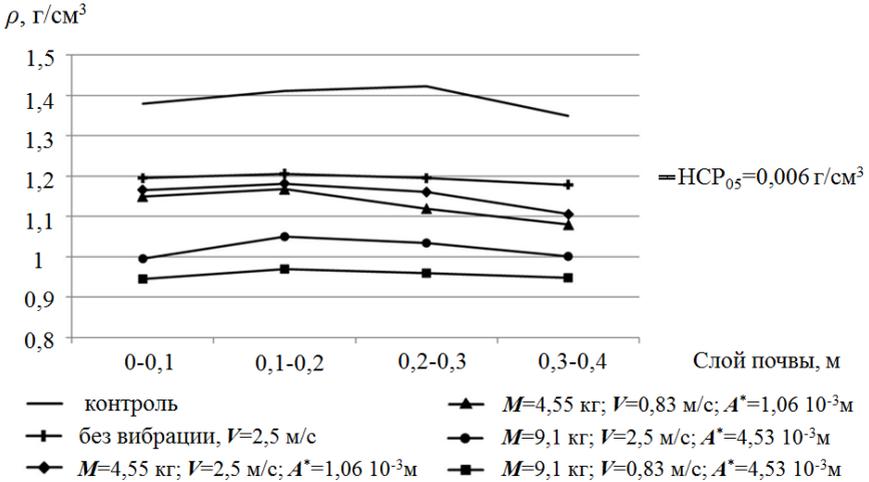


Рисунок 11 – Графики зависимости плотности почвы ρ от массы бегунка M и поступательной скорости движения агрегата V : A^* – амплитуда колебаний рабочих органов, определённая на стационаре

При использовании ГВ-1,8 на рабочей скорости 2,5 м/с с бегунком массой 9,1 кг (амплитуда колебаний рабочих органов, определённая на стационаре составила 4,53 10⁻³ м), по сравнению с режимом работы без вибрации на той же скорости, позволяет снизить тяговое сопротивление с 28,5 до 24,4 кН, или на 14,38%. При этом удельная энергоёмкость обработки снижается с 197,22 МДж/га до 176,26 МДж/га, или на 10,62%. Установлено, что снижение тягового сопротивления машины приводит к снижению буксования колёс трактора, за счёт чего производительность за час основного времени возрастает с 1,16 га/ч до 1,29 га/ч, или на 11,2%.

На основании сравнительной коммерческой оценки определена экономическая эффективность применения вибрационного глубокорыхлителя ГВ-1,8. Использование ГВ-1,8 в производственных условиях позволяет сократить прямые эксплуатационные затраты на единицу работы на 25,93%, снизить удельную трудоёмкость выполнения безотвальной обработки на 35,76%. Экономия средств составляет 163,51 руб/га, обеспечивая срок окупаемости 1,2 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам теоретических и экспериментальных исследований сделаны следующие общие выводы:

1. Теоретическими исследованиями установлены математические зависимости вынуждающей силы, эффективной мощности и амплитуды создаваемых

вибровозбудителем колебаний от его параметров. Обосновано и защищено патентом устройство вибровозбудителя, обеспечивающее его максимальную эффективную мощность.

2. Разработана лабораторная модель вибрационной почвообрабатывающей машины. Получено уравнение регрессии амплитуды колебаний лабораторной модели вибрационной почвообрабатывающей машины от массы бегунка, частоты вращения ротора вибровозбудителя и её собственной массы, определена мощность вибровозбудителя.

3. При использовании глубокорыхлителя вибрационного ГВ-1,8 на рабочей скорости 2,5 м/с с бегунком массой 9,1 кг (амплитуда колебаний рабочих органов, определённая на стационаре составила $4,53 \cdot 10^{-3}$ м), по сравнению с режимом работы без вибрации на той же скорости, достигается снижение глубистости на 18 % (с 26% до 8%), гребнистости на 9,5 % (с 21% до 11,5%), сохранение стерни повышается на 29 % (с 52% до 81%), снижается забивание рабочих органов влажной почвой. Использование вибрации рабочих органов глубокорыхлителя на рабочей скорости 2,5 м/с позволило повысить коэффициент структурности почвы в слое 0...0,4 м с 0,249 до 0,380 за счёт интенсивного крошения крупных почвенных агрегатов размером 20...100 10^{-3} м и снижения содержания пылевидных частиц. В режиме работы с вибрацией рабочих органов на рабочей скорости 2,5 м/с, по сравнению с режимом без вибрации, достигается снижение плотности почвы в слое 0...0,4 м с 1,19 до 1,02 г/см³, что обеспечивает её рациональное значение для большинства полевых культур.

4. При использовании глубокорыхлителя вибрационного ГВ-1,8 на рабочей скорости 2,5 м/с с бегунком массой 9,1 кг (амплитуда колебаний рабочих органов, определённая на стационаре составила $4,53 \cdot 10^{-3}$ м), по сравнению с режимом работы без вибрации на той же скорости, позволяет снизить тяговое сопротивление с 28,5 до 24,4 кН, или на 14,38%. При этом удельная энергоёмкость обработки снижается с 197,22 МДж/га до 176,26 МДж/га, или на 10,62%. Установлено, что снижение тягового сопротивления машины приводит к снижению буксования колёс трактора, за счёт чего производительность за час основного времени возрастает с 1,16 га/ч до 1,29 га/ч, или на 11,2%.

5. Использование экспериментального вибрационного глубокорыхлителя в производственных условиях позволяет сократить прямые эксплуатационные затраты на единицу работы на 25,93%, снизить удельную трудоёмкость выполнения безотвальной обработки на 35,76%. Годовая экономия средств составляет 163,51 руб/га, обеспечивая срок окупаемости 1,2 года.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Изучить влияние направления вынужденных колебаний рабочих органов глубокорыхлителя на агротехнические показатели его работы.

Разработать рекомендации по использованию вибрационного глубокорыхлителя на различных типах почв.

Разработать комбинированную почвообрабатывающую машину для разноглубинной обработки почвы с использованием энергии вибрации рабочих органов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Нагайка, М. А.** Повышение продуктивности пашни путём разуплотнения переуплотнённых почв / М. А. Нагайка // Вестник ИрГСХА. – 2013. – Вып. 58. – С. 116-122.
2. **Нагайка, М. А.** Исследование лабораторной модели вибрационной почвообрабатывающей машины / М. А. Нагайка, С. С. Глушков, С. Г. Шукин // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2015. – № 2. – С. 96-104.
3. **Нагайка, М. А.** Исследование рабочего процесса вибрационного глубокорыхлителя / М. А. Нагайка, С. Г. Шукин, В. А. Головатюк // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 6. – С. 110-114.
4. Альт, В. В. Концепция развития почвообрабатывающих машин и способ снижения затрат на глубокую обработку почвы / В. В. Альт, С. Г. Шукин, В. А. Вальков, **М. А. Нагайка** // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – № 9. – С. 68-71.
5. Шукин, С. Г. Исследование процесса обработки почвы вибрационным рыхлителем / С. Г. Шукин, **М. А. Нагайка**, В. А. Головатюк // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – Новосибирск, 2015. – № 3. – С. 83-90.

Патенты:

6. Патент РФ на изобретение № 2578745, В06В1/16. Вибровозбудитель / С. Г. Шукин, В. В. Альт, **М. А. Нагайка**, В. А. Вальков. – Заявл. 15.12.2014, опубл. 27.03.2016. Бюл. № 9. – 6 с.

Публикации в других изданиях:

7. Шукин, С. Г. Технология и техническое средство для разуплотнения почв на основе использования энергии неуравновешенной массы / С. Г. Шукин, В. А. Головатюк, **М. А. Нагайка** // Модернизация сельскохозяйственного производства на базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем: сборник докладов XII международной научно-технической конференции (10-12 сентября 2012г., г. Углич). – Москва, 2012. – С. 501-509.
8. **Нагайка, М. А.** Prospects of application of vibratory technical means in the no-till technology / М. А. Нагайка, С. Г. Шукин, Г. Н. Короткова // Инновационные подходы в решении проблем АПК: материалы научно-практической конференции аспирантов и соискателей НГАУ. – Новосибирск: Изд-во НГАУ, 2013. – С. 62-65.
9. **Нагайка, М. А.** Technology and equipment for soil decompression / М. А. Нагайка, С. Г. Шукин // Наука в современном информационном обществе: материалы Международной научно-практической конференции (7-8 ноября 2013 г., г. Москва). – North Charleston, SC, USA, изд-во Create Space, 2013. – С. 151-156.
10. Альт, В. В. Классификация системы машин в земледелии применительно для разных по интенсивности технологий производства кормов / В. В. Альт, С. Г. Шукин, **М. А. Нагайка** // Вестник всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2013. – №2(10). – С. 127-137.
11. **Нагайка, М. А.** Обоснование конструктивных параметров центробежного вибровозбудителя планетарного типа / М. А. Нагайка, М. С. Соппа, С. Г.

Щукин // Молодежь в аграрной науке и образовании – инновационный потенциал будущего: материалы Всерос. науч.-практ. конф.. – Новосибирск: Изд-во НГАУ, 2013. – С. 95-101.

12. **Нагайка, М. А.** Исследование режима работы центробежного вибровозбудителя планетарного типа применительно к рабочим органам почвообрабатывающих машин / М. А. Нагайка, С. Г. Щукин // Совершенствование конструкции, эксплуатации и технического сервиса автотракторной и сельскохозяйственной техники: материалы Межд. науч.-практ. конф.. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. – С. 291-295.

13. **Нагайка, М. А.** Определение мощности вибровозбудителя / М. А. Нагайка, С. Г. Щукин // Актуальные проблемы развития АПК в работах молодых учёных Сибири: материалы Регион. науч.-практ. конф. молодых учёных Сибирского федерального округа . – Новосибирск: Изд-во НГАУ, 2015. – С. 100-105.