

На правах рукописи



Федоров Сергей Евгеньевич

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ
ПОЧВЫ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ЖЕСТКОСТИ
УПРУГОЙ СТОЙКИ КУЛЬТИВАТОРА**

Специальность 05.20.01 – «Технологии и средства
механизации сельского хозяйства»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саранск 2016

Работа выполнена на кафедре сельскохозяйственных машин имени профессора А.И. Лещанкина федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Чаткин Михаил Николаевич

Официальные оппоненты: **Мударисов Салават Гумерович,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», заведующий кафедрой строительно-дорожных, коммунальных и сельскохозяйственных машин

Шумаев Василий Викторович,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Пензенская государственная сельскохозяйственная академия», доцент кафедры «Физика и математика»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Столыпина»

Защита состоится 24 марта 2016 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.117.06 при ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева» по адресу: 430904, г. Саранск, п. Ялга, ул. Российская, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке им. М.М. Бахтина ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева» и на сайте http://www.mrsu.ru/ru/diss/diss.php?ELEMENT_ID=56176

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г. и размещен на официальном сайте ВАК Минобрнауки РФ <http://vak2.ed.gov.ru> и ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева» www.mrsu.ru «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



С.А. Величко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время необходимо улучшать способы и системы поверхностной обработки почвы, использовать более совершенные сельскохозяйственные машины. К ним относятся комбинированные машины и агрегаты, эксплуатация которых повышает качество выполнения технологических операций обработки почвы, сокращает число проходов по полю, потери времени на холостые проходы и заезды, денежные и трудовые затраты, увеличивает производительность труда.

Значительный интерес представляют исследования современных комбинированных культиваторов, рабочие органы которых закреплены с помощью упругих стоек. Рабочие органы на упругих стойках, встречая в процессе работы переменное сопротивление почвы, совершают вынужденные колебания. Это приводит к улучшению качества крошения почвы и снижению тягового сопротивления. Воздействие такого рабочего органа аналогично колебаниям вибратора. Однако лапы на упругой подвеске при работе имеют отклонение от установленной глубины обработки на 10-15% больше, чем при жесткой подвеске и не сохраняют оптимальную геометрию резания. Поэтому поиски научно-обоснованных путей решения задач повышения эффективности работы агрегатов для поверхностной обработки почвы, культиваторами с упругими стойками, являются актуальными и имеют важное народно-хозяйственное значение.

Исследования проводились в соответствии с планом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Института механики и энергетики ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» по теме «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы», отвечающей приоритетным научным работам вуза (ПНР – 1 № 28/2010 «Энергосбережение и новые материалы»).

Цель работы. Повышение качества и снижение энергозатрат поверхностной обработки почвы путем регулирования и оптимизации жесткости упругой стойки культиватора с адаптацией к заданным почвенным условиям работы.

Задачи исследований:

- выполнить анализ работы агрегатов для поверхностной обработки почвы, оснащенных рабочими органами на упругих стойках, выявить их недостатки и определить основные направления их совершенствования;
- разработать модели и исследовать характер процесса взаимодействия рабочего органа на упругой стойке культиватора с обрабатываемой средой, получить закономерности ее перемещения расчетом с использованием компьютерной программы APM FEM (система прочностного анализа);
- обосновать параметры и изготовить регулятор жесткости упругой стойки;
- провести лабораторные и производственные исследования рабочего органа и машинно-тракторного агрегата с культиватором, оборудованного регулятором жесткости упругих стоек, и дать сравнительную агротехническую, энергетическую и технико-экономическую оценку работы.

Объект исследований. Упругая S-образная стойка с регулятором жесткости

комбинированного культиватора.

Предмет исследований. Процесс взаимодействия рабочего органа на упругой S-образной стойке с почвой.

Научная новизна работы.

- дифференциальные уравнения движения рабочего органа на упругой стойке комбинированного культиватора, позволяющие определить основные параметры стойки в широком диапазоне изменения почвенных условий;

- модель процесса взаимодействия рабочего органа на S-образной стойке комбинированного культиватора с обрабатываемой средой с использованием компьютерной программы APM FEM;

- результаты лабораторных и производственных исследований рабочего органа на упругой S-образной стойке с регулятором жесткости комбинированного культиватора для поверхностной обработки почвы.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

- результаты автоматизированного расчета колебательного процесса упругой S-образной стойки с использованием компьютерной программы APM;

- лабораторные установки по испытанию упругих стоек;

- стендовые и лабораторные испытания в почвенном канале упругой S-образной стойки;

- рекомендации по применению регулятора жесткости упругой стойки комбинированного культиватора.

Рабочий орган на упругой стойке с регулятором жесткости внедрен в хозяйствах ОАО агрофирма «Искра» Атяшевского муниципального района, ФГУП «1-е Мая» Россельхозакадемии Республики Мордовия. Результаты исследований используются в ОАО «МордовАгроМаш».

Методы исследования. Теоретические исследования выполнены с использованием методов классической механики, моделирования, математической статистики, теории упругости. При вычислениях использовались программные продукты EXCEL, APM FEM. Экспериментальные исследования выполнялись с применением измерительной аппаратуры, стандартных и оригинальных методик и нормативов по планированию и получению опытных данных.

Апробация работы. Результаты основных положений диссертации докладывались и обсуждались на итоговых научных конференциях профессорско-преподавательского состава и аспирантов МГУ имени Н.П. Огарева (2011-2015), на IX Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения и памяти докт. с.-х. наук, профессора С. А. Лапшина «Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции» г. Саранск, 2013, Международной научно-технической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы» г. Саранск, 2014, VII Всероссийской научно-практической конференции «Основные направления развития техники и технологий в АПК» г. Княгинино, 2015.

Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

- дифференциальные уравнения движения рабочего органа на упругой стойке комбинированного культиватора;

- модель процесса взаимодействия рабочего органа на S-образной стойке комбинированного культиватора с обрабатываемой средой с использованием компьютерной программы APM FEM;

- результаты сравнительных лабораторных и производственных исследований рабочего органа на S-образной стойке с регулятором жесткости комбинированного культиватора для поверхностной обработки почвы;

- рекомендации по применению регулятора жесткости упругой стойки комбинированного культиватора.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 10 печатных работах, в т. ч. 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы и приложения. Диссертация изложена на 170 страницах машинописного текста, содержит 25 таблиц, 52 иллюстрации, 21 с. приложений. Список использованной литературы включает 142 наименования, из них 5 на иностранном языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность темы, дана общая характеристика работы, ее практическая значимость, изложены основные научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

В первой главе «Постановка вопроса и задачи исследования» описаны технологические требования к качеству предпосевной обработки почвы, анализ конструкций отечественных и зарубежных комбинированных культиваторов с рабочими органами на упругих стойках, представлена классификация и анализ упругих стоек, а также анализ влияния подвески рабочего органа на тяговые и агротехнические показатели.

В результате исследований установлено, что культиваторы с упругими стойками, встречая в процессе работы переменное сопротивление почвы, совершают вынужденные колебания. Это приводит к улучшению качества крошения почвы и снижению тягового сопротивления.

Изучением колебаний рабочих органов на упругих стойках занимались: Р. С. Багманов, Н. В. Бугайченко, П.Н. Бурченко, П. М. Василенко, А. А. Вилде, М. А. Донченко, К. И. Жукевич, Р. М. Зоненберг, В. И. Игнатенко, Е. Л. Кондратьев, П. М. Котов, Н. В. Краснощеков, С. В. Левицкий, Л. Б. Лурье, В. Б. Моргачев, С. Г. Мударисов, А. Г. Рябцев, Ф. М. Садриев, Г. Э. Свирский, В. И. Усков, М. Н. Чаткин, И. А. Шевченко, В. В. Шумаев, A. Colde, A. Eggenmuller и другие отечественные и зарубежные ученые.

Существенный недостаток работы рабочего органа на упругой стойке заключается в том, что в процессе взаимодействия с почвой происходит колебание и отклонение носка лапы от первоначального положения на 10-15 % больше, чем установлено, поэтому меняются агротехнические показатели, сопротивление движению и соответственно частота и амплитуда колебаний стойки, что приводит к снижению эффективных показателей работы культиватора. Оптимальный режим работы упругой стойки для

заданных почвенных условий можно получить только на определенной глубине обработки. С изменением глубины обработки необходимы другие конструктивные параметры упругой стойки, которые можно достичь только их заменой для соответствующих почвенных условий, что приводит к увеличению производственных затрат.

Поэтому для стабилизации эффективных показателей работы исполнительской части упругой стойки культиватора целесообразно предусмотреть регулятор жесткости, что позволяет ее адаптировать на почвах с различной влажностью и твердостью.

Во второй главе «Разработка и анализ динамической модели нагруженности рабочих органов на упругих стойках» проведено математическое описание напряженно-деформированного состояния стойки на основе теории упругости и механики стержней.

Рабочий орган на упругой стойке, взаимодействующий с почвенной средой, является системой с распределенными параметрами: массы и нагрузки по длине стойки. Расчетная схема упругой стойки представляет собой кривой плоский брус переменного сечения с распределенной нагрузкой в его нижней части, движущейся с постоянной скоростью V (рис. 1).

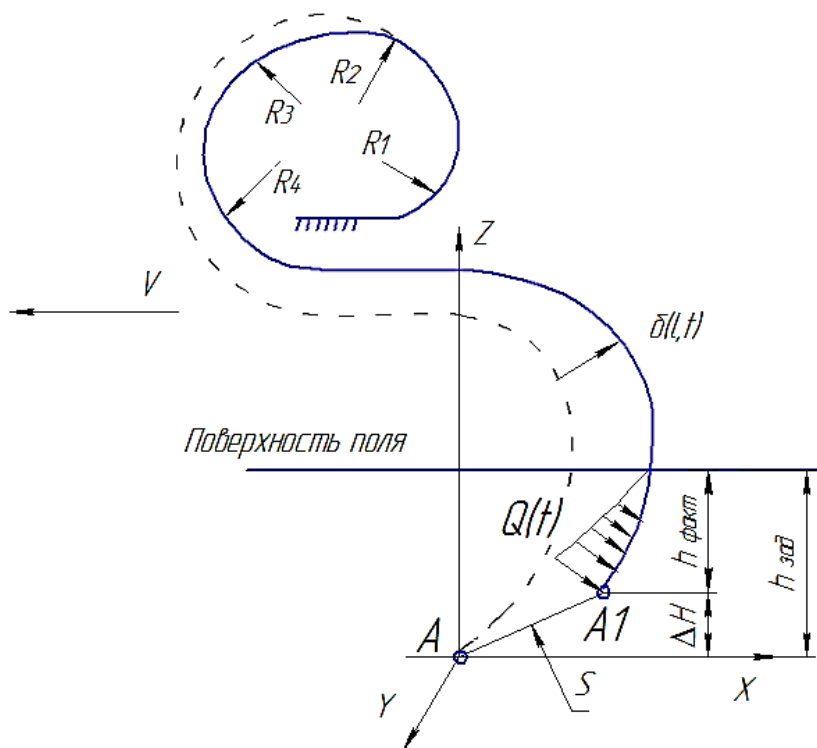


Рисунок 1 - Расчетная схема упругой стойки
(пунктиром показано начальное положение, сплошным – под нагрузкой)

Распределенная по подземной части нагрузка $P(t)$ имеет постоянную составляющую P_0 , на которую накладывается ее переменная составляющая $P_v(t)$.

$$P(t) = P_0 + P_v(t). \quad (1)$$

Конфигурацию упругой стойки запишем в параметрической форме:

$$x = x(l); \quad z = z(l), \quad (2)$$

где l – расстояние текущего сечения по осевой линии от ее начала, являющееся здесь параметром.

Под действием нагрузки $P(t)$ стойка деформируется; ее упругие смещения $\delta(l, t)$ различны по длине стойки; носок рабочего органа (точка A) получает смещение S , определяющее величину деформации стойки. Деформации считаются находящимися в пределах упругости.

Для математического моделирования нагруженности упругой стойки рассмотрен дугообразный бесконечно малый элемент с радиусом кривизны R и углом наклона θ , ограниченный двумя сечениями, проходящими через центр кривизны и составляющими угол $d\theta$. Радиус ближней грани элемента r , высота элемента dr , длина элемента $dl = r d\theta$ (рис. 2). На гранях элемента действуют нормальные $\sigma_\theta, \sigma'_\theta, \sigma_r, \sigma'_r$ и тангенциальные $\tau_\theta, \tau'_\theta, \tau_r, \tau'_r$ напряжения. Умножая напряжения на площадь граней, получим силы $F_{\sigma r}, F'_{\sigma r}, F_{\sigma \theta}, F'_{\sigma \theta}, F_{\tau r}, F'_{\tau r}, F_{\tau \theta}, F'_{\tau \theta}$ на гранях.

В центре элемента действуют силы инерции и тяжести. Постоянные силы тяжести элемента mg , направлены всегда вниз под углом $\theta(l)$. Силы инерции определяются по выражению:

$$\bar{F}_i = -m \frac{d^2 \bar{s}}{dt^2}, \quad (3)$$

где m - масса элемента, $m = \rho \cdot V_3$;

V_3 - объем элемента, $V_3 = b \cdot dr \cdot d\theta$;

ρ - плотность материала стойки.

Составляющие силы инерции по осям r и ξ :

$$F_{ir} = -\rho V_3 \frac{d^2 u}{dt^2}; \quad F_{i\theta} = -\rho V_3 \frac{d^2 v}{dt^2}, \quad (4)$$

где u, v - радиальные и тангенциальные смещения элемента соответственно.

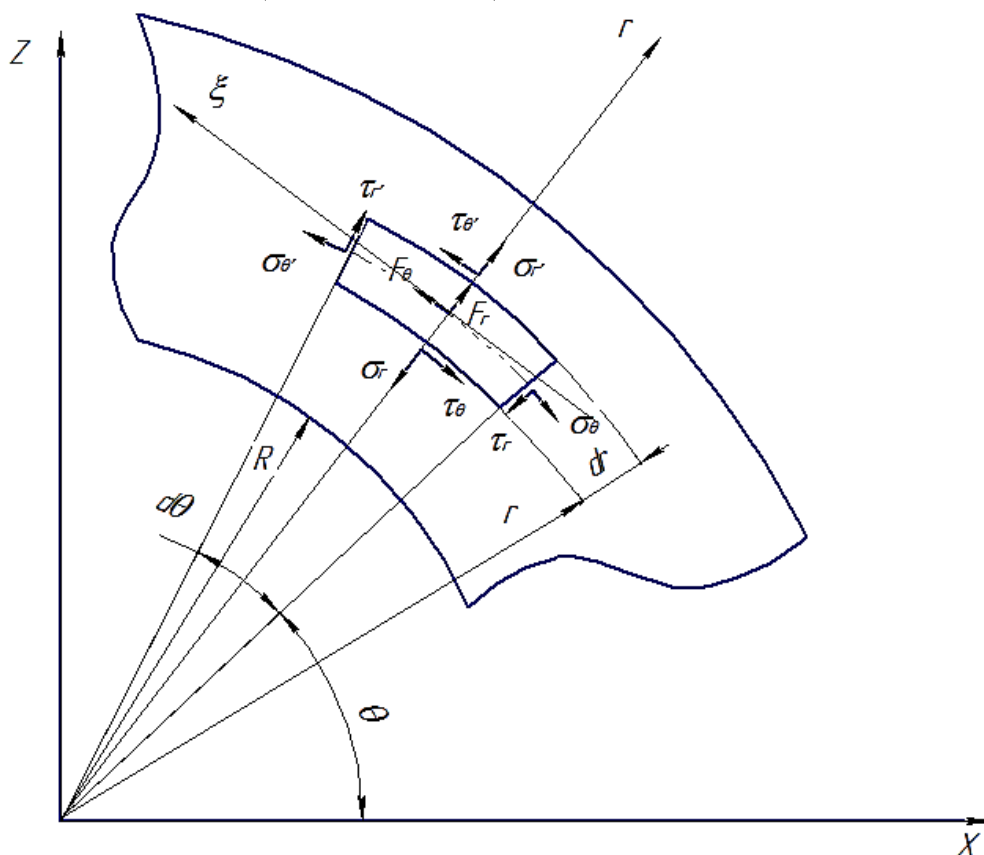


Рисунок 2 – Расчетная схема напряженно-деформированного состояния упругой стойки

Математическая модель напряженно-деформированного состояния (НДС) кривого бруса как объекта с распределенными параметрами выражается системой уравнений:

- равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{\partial l} + \frac{1}{r}(\sigma_r + \sigma_\theta) = f_{0r}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial l} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = f_{0\theta}, \quad (6)$$

где $f_{0r}, f_{0\theta}$ – объемные силы.

- Коши:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{\partial v}{\partial l} + \frac{u}{r}; \quad \gamma_{\theta r} = \frac{\partial u}{\partial l} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ – относительные удлинения;

$\gamma_{\theta r}$ – сдвиг;

- обобщенного закона Гука:

$$\sigma_r = E_1(\varepsilon_r + \mu\varepsilon_\theta); \quad \sigma_\theta = E_1(\mu\varepsilon_r + \varepsilon_\theta); \quad \tau_{r\theta} = G\gamma_{\theta r}, \quad (8)$$

где E – модуль упругости;

G – модуль сдвига;

μ – коэффициент Пуассона.

- совместимости:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial l} + \frac{\partial^2}{\partial l^2} \right) \cdot \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial \varphi}{\partial l} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial l^2} \right) = 0, \quad (9)$$

где $\varphi(r, l)$ – функция напряжений.

Заменой компонентов напряжений в уравнениях равновесия (5), (6) компонентами смещений через уравнения Коши (7) и Гука (8) получили динамическую модель в перемещениях:

$$\begin{cases} (G + E_1\mu) \frac{\partial^2 v}{\partial l \partial r} + G \frac{\partial^2 u}{\partial l^2} + G \frac{\partial v}{\partial l} + 2 \frac{G}{r} \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\partial v}{\partial l} - \frac{u}{r} \right) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ G \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + (G + E_1\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial l \partial r} + E_1 \frac{\partial^2 v}{\partial l^2} - G \frac{\partial v}{\partial r} + E_1 \frac{\partial u}{\partial l} + 2 \frac{G}{r} \left(\frac{\partial u}{\partial l} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}. \end{cases} \quad (10)$$

Силами тяжести в рассматриваемой задаче о колебаниях можно пренебречь. Первое уравнение описывает колебания по нормали к оси, а второе – по касательной к ней.

Если пренебречь растяжением оси стойки, то составляющие вектора смещения оказываются связанными соотношением: $u = -\frac{R\partial v}{\partial l}$, периодическое решение примет форму:

$$v = W(l) \cos \omega t; \quad u = -RW(l) \cos \omega t, \quad (11)$$

где $W(l)$ – временный множитель, определяющий форму собственных колебаний;

ω – частота колебаний.

Подставив (11) в (10) получим уравнение относительно $W(l)$:

$$G \frac{\partial W}{\partial l} - G \frac{\partial^2}{\partial l^2} \left(R \frac{\partial W}{\partial l} \right) - 2E_1 \frac{\partial^2 W}{\partial l^2} - 2 \frac{G}{r} \left(\frac{\partial}{\partial l} \left(R \frac{\partial W}{\partial l} \right) + \frac{W}{r} \right) = -\rho \omega^2 \left(R \frac{\partial W}{\partial l} + W \right), \quad (12)$$

Решение уравнения (12) представляется в виде фундаментальной системы:

$$W(l) = C_1 \sin \beta l + C_2 \cos \beta l + C_3 \operatorname{sh} \beta l + C_4 \operatorname{ch} \beta l, \quad (13)$$

где C_i – неизвестные постоянные коэффициенты.

Для определения постоянных C_i использовалась фундаментальная форма Коши, состоящая из линейно независимых функций ψ_i вида:

$$\psi_i(x) = \beta^{1-j} S_j(\beta l), \quad (14)$$

где $S_j(\beta l)$ – функции Крылова, являющихся линейными комбинациями функций, входящих в (12).

Для получения модели колебаний носка лапы рабочего органа на упругой стойке систему с распределенными параметрами приводим к эквивалентной системе с сосредоточенными параметрами. Для этого разложим формы упругих смещений $\delta(l, t)$ по формам собственных колебаний $\xi(l)$ и получим уравнение задачи в виде уравнения Лагранжа II рода:

$$[A]q^{*''} + [B]q^{*'} + [C]q^* = F(t), \quad (15)$$

где q^* - вектор-столбец обобщенных главных координат,

$F(t)$ - вектор обобщенных внешних воздействий,

$[A]$ - диагональная матрица коэффициентов инерции,

$[B]$ - симметричная матрица коэффициентов диссипации,

$[C]$ - симметричная матрица коэффициентов жесткости.

Все матрицы имеют размер $n * n$, определяющий число собственных частот системы. Для диапазона $0 \dots 1000$ Гц $n=20$. В общем машиностроении учитывают частоты возмущений диапазоне 60 Гц. В этом случае достаточно рассматривать частоты второго порядка и тогда $n=6$.

Таким образом, полученные выражения имеют более общий характер, так как учитывают криволинейность упругого тела непосредственно в уравнениях равновесия. Это указывает на то, что возможности ограничения перемещений носка лапы рабочего органа определяются физико-механическими свойствами материала, геометрией, формой и сечением стойки.

Поэтому для стабилизации эффективных показателей работы рабочего органа на упругой стойке комбинированного культиватора целесообразно предусмотреть регулятор жесткости. За счет изменения его геометрии и точки подвеса позволяет адаптировать стойку на почвах с различной влажностью и твердостью с соблюдением агротехнических требований (рис. 3).

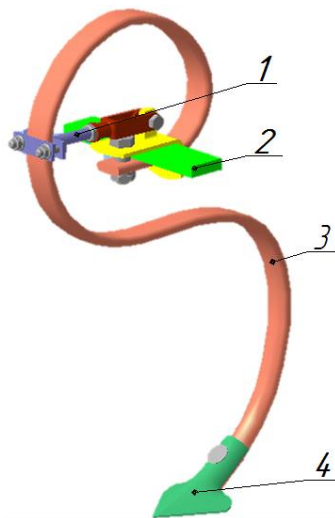


Рисунок 3 – Упругая стойка с регулятором жесткости:

1 – регулятор жесткости; 2 – рама; 3 – упругая стойка; 4 – лапа (ширина 105 мм)

Решение полученных моделей аналитическими методами путем подстановки параметров упругой стойки и учета начальных условий трудоемко. В настоящее время эти модели реализуются методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программных комплексов, включающих в себя следующие элементы: редактор разбивки на конечные элементы, ядро, непосредственно обеспечивающее решение, и визуализатор для демонстрации полученных результатов. В данной работе использовалась компьютерная программа APM FEM.

Уравнение равновесия представляется в виде:

$$\vec{R} = [K] \cdot \vec{u}, \quad (16)$$

где – $[K]$ матрица жесткости конечного элемента размерности 6×6 ;

\vec{u} – вектор узловых перемещений;

\vec{R} – реакции, приложенные к граням элемента.

Для проведения расчета, с учетом условий работы упругой стойки, был задан ее материал - Сталь 60С2А (модуль упругости $E=212000$ МПа, модуль сдвига $G=82000$ МПа, твердость $HRC=46 \dots 52$). Также были заданы геометрические параметры, соответствующие упругой стойке комбинированного культиватора ИМТ-616.15.

Целью расчета было определить перемещения, напряжения и формы колебаний в зависимости от нагрузки и изменения положения защемления свободного конца упругой стойки. Эти данные необходимы для создания универсальной культиваторной стойки. Максимальная нагрузка выбиралась с учетом удельного сопротивления почвы и была принята за 2500Н. Интервал изменения нагрузки – 250Н. Жесткость стойки увеличивалась с уменьшением ее рабочей длины (L). Это удалось достичь за счет разных положений защемления свободного конца упругой стойки, которые показаны на рис. 4.

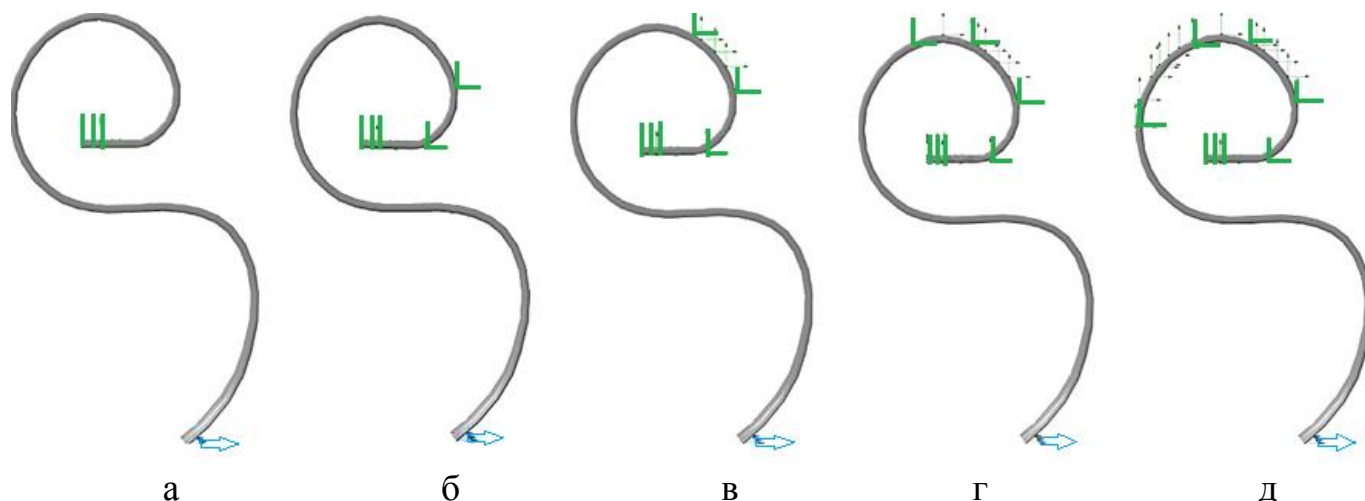
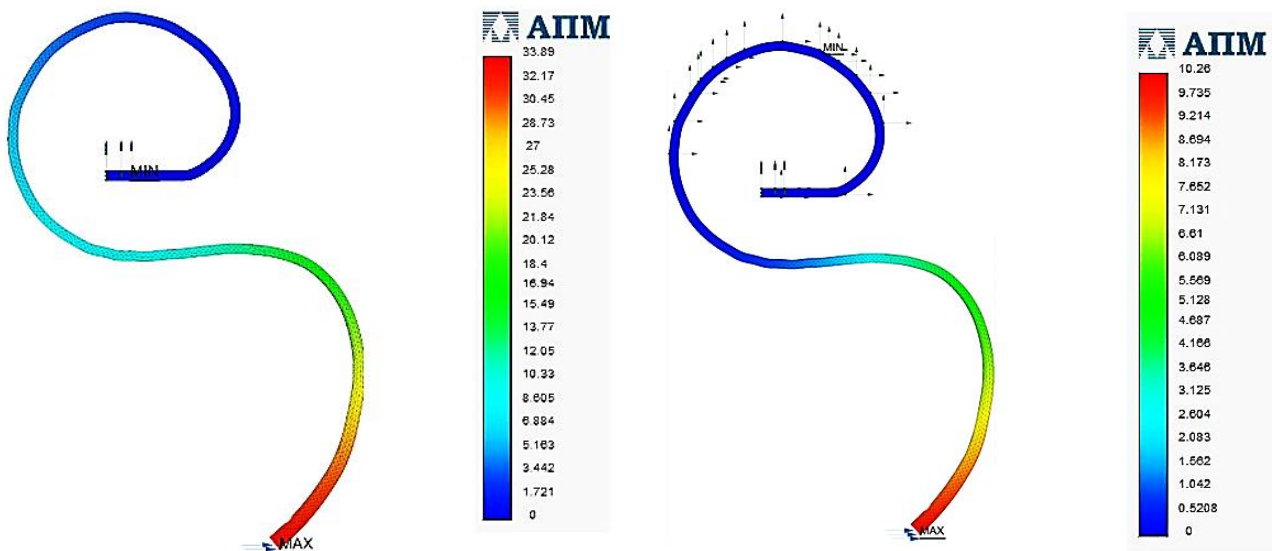


Рисунок 4 – Схемы защемления свободного конца упругой S-образной стойки:
а – защемление 1 (стандартное); б – защемление 2; в – защемление 3;
г – защемление 4; д – защемление 5

Конечно-элементная модель стойки содержит 6240 конечных элементов (тетраэдров) и 20600 узлов. Колебание упругой S-образной стойки при нагрузке 250 Н представлены на рис. 5.



а б

Рисунок 5 – Максимальные перемещения стойки при нагрузке 250 Н:
а - защемление 1; б - защемление 5

Из колебаний упругой S-образной стойки (рис. 5) видно, что с уменьшением рабочей длины стойки суммарные максимальные перемещения уменьшаются. В результате расчета были построены следующие графики (рис. 6 – 8):

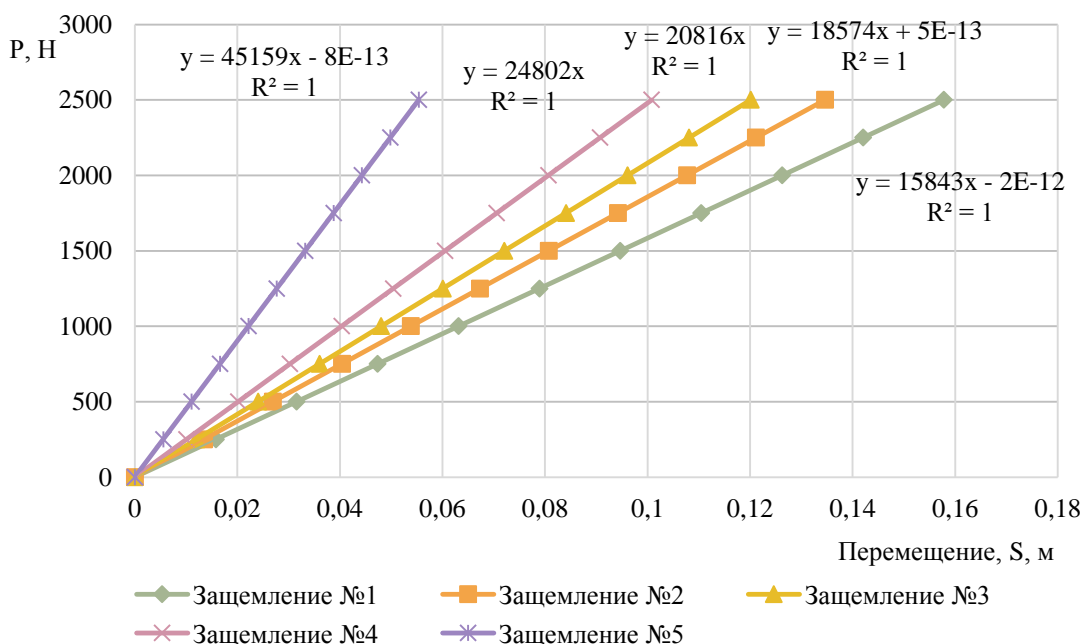


Рисунок 6 – Перемещение по оси OZ (соответствует глубине обработки)

Анализируя графическую зависимость «нагрузка-перемещение» (рис.6) следует:

1. Все зависимости выражаются прямыми линиями, то есть напряжения в стойке не превышают предела пропорциональности.

2. С уменьшением рабочей длины стойки растет угол наклона прямых, а значит, увеличивается ее жесткость.

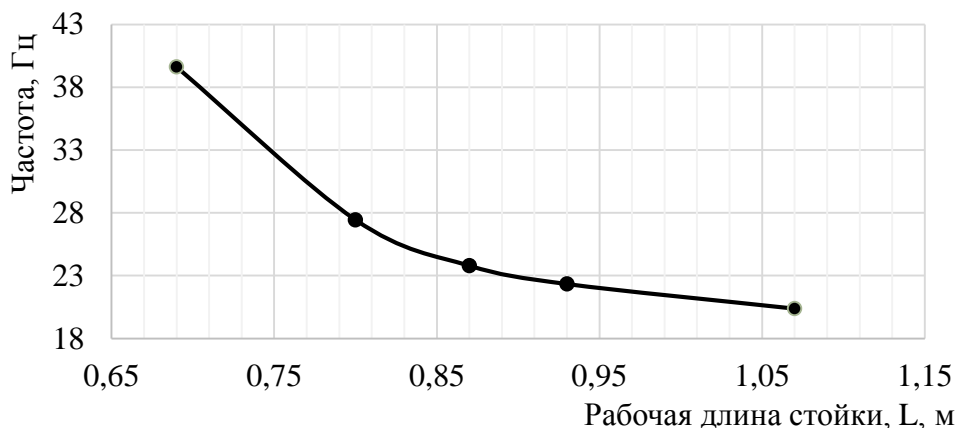


Рисунок 7 – Зависимость собственной частоты колебаний носка лапы упругой стойки от ее рабочей длины (L) для первой формы колебаний

Анализ зависимости «частота – рабочая длина стойки (L)» (рис. 7) показывает:
- с уменьшением рабочей длины стойки увеличивается ее частота, что должно способствовать лучшему крошению почвы.

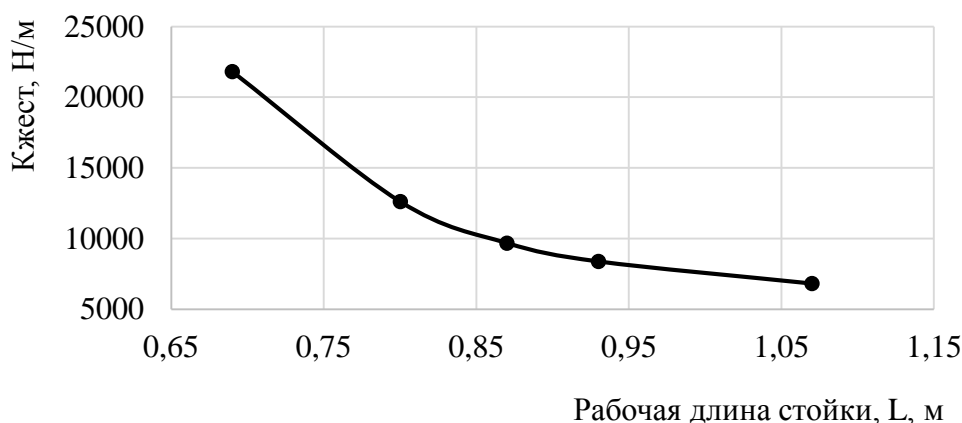


Рисунок 8 – Общий коэффициент жесткости упругой стойки по осям Ox , Oz и Oy

Из анализа зависимости «коэффициент жесткости – рабочая длина стойки» (рис. 8) видно:

- с уменьшением рабочей длины стойки жесткость ее увеличивается.

Принятое нами направление увеличения жесткости стойки за счет уменьшения рабочей длины стойки подтверждается результатами проведенного анализа работы стойки и требует экспериментального подтверждения.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» изложена общая программа и методика экспериментальных исследований. Программа включала лабораторные и полевые исследования.

Лабораторные исследования проведены с целью установления характера взаи-

модействия упругой стойки с почвой и степени влияния конструктивных параметров на тяговое сопротивление и отклонение носка лапы от заданной глубины.

Для проверки данных автоматизированного расчета S-образной стойки нами был спланирован эксперимент по статическому нагружению стойки. С его помощью удалось провести имитацию тягового сопротивления и получить качественные показатели работы при различных вариантах заземления свободного конца упругой стойки с целью выбора расположения и типа исполнения регулятора жесткости. Для исследований использовали лабораторный стенд (рис. 9). Стенд состоит из корпуса 1, динамометра (ДПУ-0,5/2) 2, нагрузочного механизма 3, двух неподвижных блоков 4, троса 5, тарировочного экрана 6, упругой S-образной стойки 7, механизма крепления стойки 8.

Испытания проводились следующим образом: свободный конец S-образной стойки заземляли в трех различных положениях 9 для увеличения жесткости за счет уменьшения ее рабочей длины. С помощью нагрузочного механизма 3 создавали усилие в диапазоне 0...2500 Н с интервалом 500 Н.

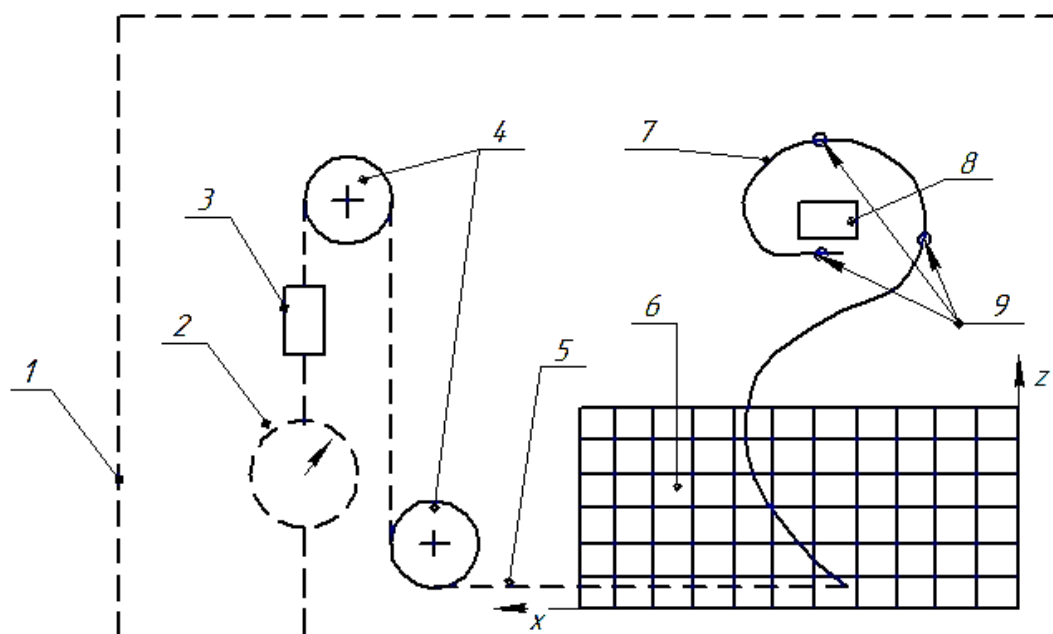


Рисунок 9 – Схема лабораторного стенда для испытаний упругих стоек

На этапе исследования ставился многофакторный эксперимент первого порядка. В качестве параметра оптимизации работы S-образной стойки принимали тяговое усилие и отклонение носка лапы упругой стойки от заданной глубины, а активными факторами являлись контролируемые переменные: глубина обработки, скорость движения стойки, жесткость стойки. Опыты производились с четырехкратной повторностью, по их результатам рассчитывалось уравнение регрессии. Значимость полученных коэффициентов и адекватность модели проверялась соответственно по критериям Стьюдента и Фишера.

Для изучения показателей работы упругих стоек была разработана лабораторная установка и подготовлено контрольное измерительное оборудование (рис. 10).

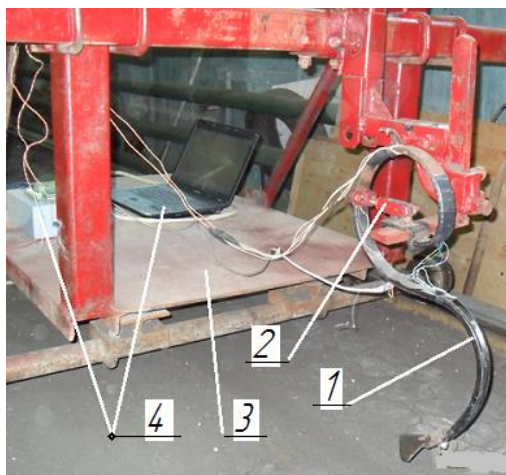


Рисунок 10 – Лабораторная установка:

- 1 – упругая S-образная стойка с наклеенными тензодатчиками (сопротивление – 100 Ом, база 20 мм); 2 – регулятор жесткости; 3 – тележка; 4 – измерительная аппаратура (ZETLab)

Определение агротехнических и энергетических показателей работы комбинированного культиватора с упругими стойками, агрегируемого с трактором МТЗ-1221, проводилось в полевых условиях на чистом поле. Тип почвы – выщелоченный чернозем, рельеф ровный, твердость в пределах 1 – 1,25 МПа, влажность 20...26%.

Опыты проводились по общепринятой методике согласно ГОСТу и ОСТу.

При обработке экспериментальных данных использовались программные продукты EXCEL. Полученные данные обрабатывались согласно общепринятым методикам и действующему стандарту.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» представлены основные результаты лабораторных и полевых экспериментов.

В результате спланированного эксперимента по статическому нагружению стойки получили следующее: перемещения стойки вдоль оси OY являются минимальными (ими мы пренебрегаем); наибольшие перемещения наблюдались по осям OX и OZ (соответствуют направлению движению и глубине обработки).

Сводный график для трех положений защемления представлен на рис. 11.

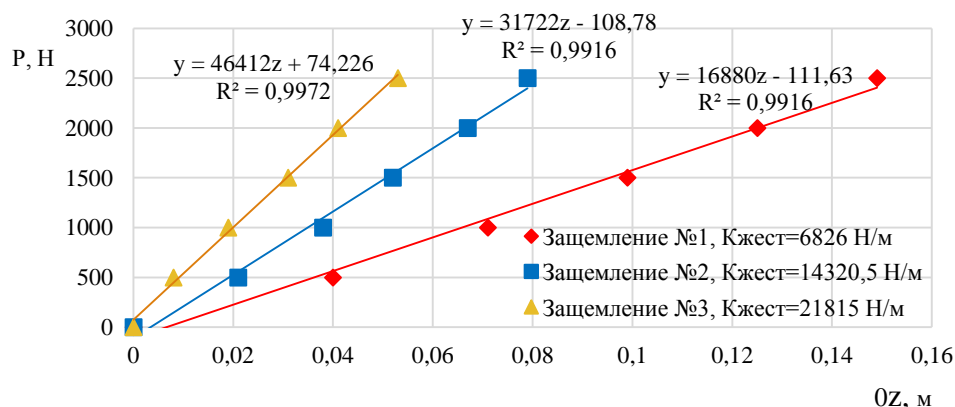


Рисунок 11 – Перемещение рабочего органа на упругой стойке культиватора под действием приведенной силы по оси OZ

Результаты полученных данных показывают, что с увеличением жесткости стойки культиватора перемещение под действием приложенной нагрузки снижается за счет уменьшения рабочей длины стойки. Следовательно, применение в конструкции стойки регулятора жесткости позволяет ее использование на почвах различной влажности и твердости с выполнением агротехнических требований.

Результаты многофакторного эксперимента по определению рациональных режимов работы упругой S-образной стойки в почве позволили определить уравнение регрессии, устанавливающее связь между отклонением носка лапы ΔH от заданной глубины обработки и численными значениями режимов работы S-образной стойки:

$$\Delta H = 0,0257 + 0,1933h + 0,0030v - 0,0017K_{жест}, \quad (17)$$

где h - глубина обработки, м;

V - скорость движения стойки, м/с;

$K_{жест}$ - жесткость стойки, кН/м.

Полученную модель проверяли по критерию Фишера. Она адекватно описывает влияние принятых факторов на отклонение носка лапы от заданной глубины обработки.

Данная зависимость представлена на рис. 12.

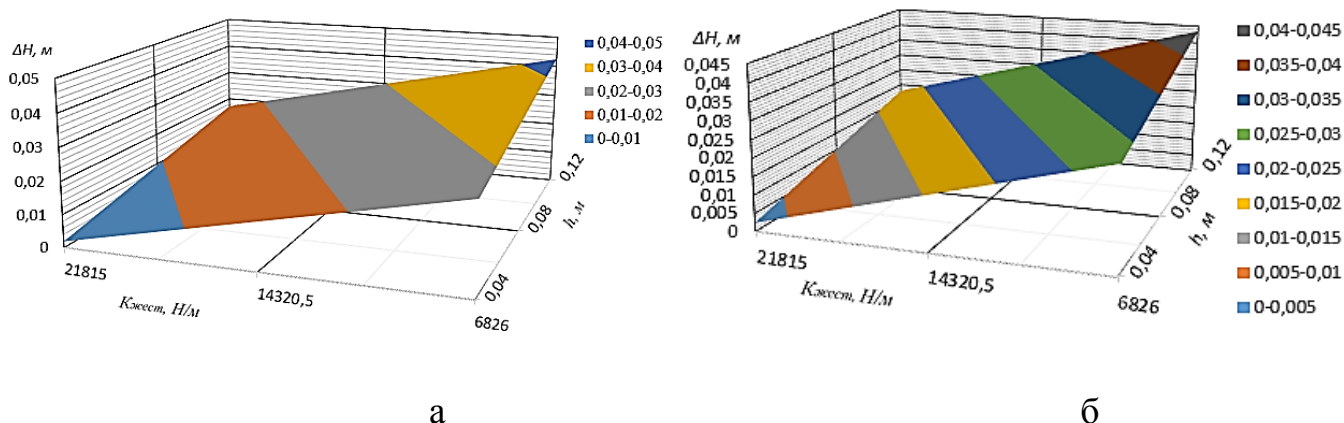


Рисунок 12 - Зависимость отклонения носка лапы упругой S-образной стойки от заданной глубины обработки и жесткости стойки:

а – скорость 2 м/с, б – скорость 3 м/с

Анализ графиков показывает, что с увеличением глубины обработки и скорости агрегата – отклонение носка лапы увеличивается. При увеличении жесткости стойки отклонение носка лапы снижается. Максимальное отклонение наблюдается при скорости 3 м/с, глубине 0,12 м, жесткости стойки 6826 Н/м.

При проведении многофакторного эксперимента также фиксировалось влияние глубины обработки h , скорости движения упругой S-образной стойки V , жесткости стойки $K_{жест}$ на тяговое сопротивление $P_{тяг}$. Получено уравнение регрессии:

$$P_{тяг} = -72,3 + 5890,62h + 26,25v - 6,25K_{жест}. \quad (18)$$

Графики зависимости тягового сопротивления от жесткости стойки, скорости и глубины обработки почвы приведены на рис.13.

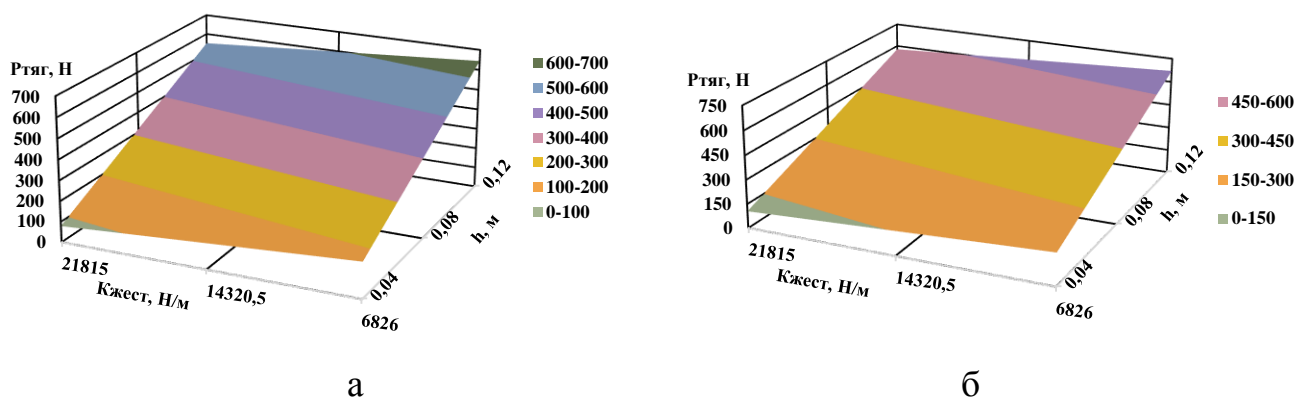


Рисунок 13 - Зависимость тягового сопротивления упругой S-образной стойки от глубины обработки почвы и жесткости стойки:
 а – скорость 2 м/с, б – скорость 3 м/с

Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении глубины обработки от 0,04 м до 0,12 м и при скорости 2 м/с тяговое сопротивление упругой S-образной стойки возрастет с 95 Н до 646 Н, а при скорости 3 м/с – с 105 Н до 670 Н. Следует заметить, что увеличение жесткости стойки с 6826 Н/м до 21815 Н/м приводит к снижению тягового сопротивления на 100 Н.

С целью дальнейшего обоснования параметров упругой S-образной стойки нами были проведены полевые исследования. Полевые исследования упругих стоек культиватора были проведены для оценки работы регулятора жесткости. Результаты исследований приведены в таблице 1 и на рис. 15-16.

Таблица 1 – Агротехнические показатели качества работы S-образной стойки

Показатели	$K_{жест}$, Н/м		
	6826	14320,5	21815
	Скорость движения - 12 км/ч, глубина обработки – 8 см		
Ширина борозды, B , см	19	17,5	14,3
Глубина борозды, H , см	3,5	3,1	2,5
Крошение почвы, %, размер фракций от 0 до 25 мм	81,2	83,1	85,1

Увеличение жесткости стойки обеспечивает улучшение качества крошения почвы и уменьшение гребнистости.

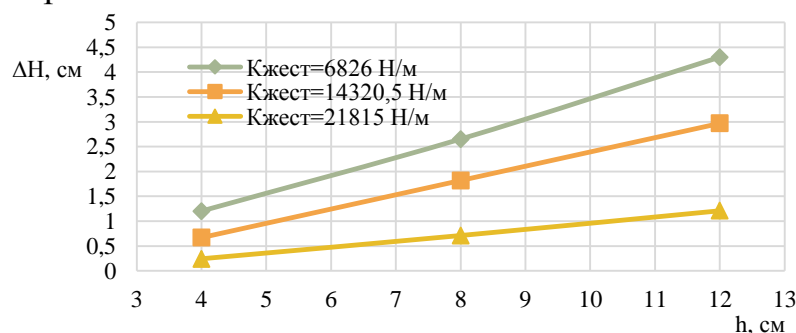


Рисунок 15 – Перемещение носка лапы рабочего органа на упругой стойке по оси OZ в зависимости от глубины обработки почвы

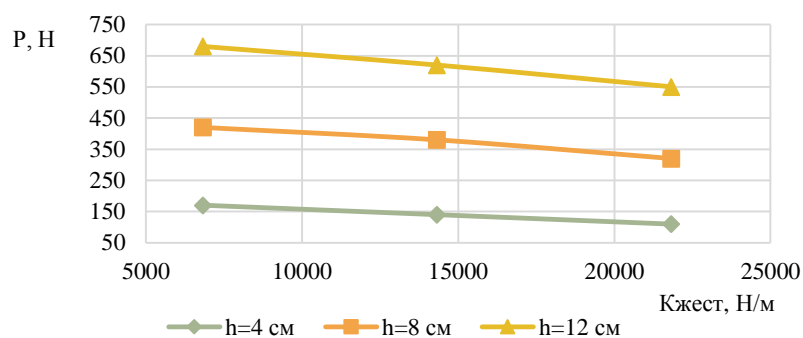


Рисунок 16 – Зависимость тягового сопротивления рабочего органа на упругой стойке от ее жесткости

Анализируя данные графические зависимости, можно сказать, что использование упругой S-образной стойки на почвах с влажностью 20-26% и твердостью 1 -1,25 МПа приводит к несоблюдению агротехнических требований, т. е. отклонение носка лапы от установленной глубины больше ± 1 см. Это подчеркивает необходимость регулирования жесткости упругой стойки культиватора. Увеличение жесткости стойки до 14320,5 Н/м позволяет ее использовать на глубине до 5 см с соблюдением агротехнических требований, а до 21815 Н/м – до 10,5 см. При этом увеличение жесткости стойки с 6826 Н/м до 21815 Н/м приводит к снижению тягового сопротивления агрегата при глубине обработки 4 см на 4,38 кН (35%); 8 см – 7,3 кН (24%); 12 см – 9,49 кН (19%), что, безусловно, подтверждает правильность и актуальность работы.

В пятой главе «Экономическая эффективность внедрения в производство упругой стойки комбинированного культиватора с регулятором жесткости» приведены результаты производственных испытаний и их анализ, а также расчет экономических показателей.

Анализ расчетных показателей экономической эффективности применения регулятора жесткости упругой стойки культиватора ИМТ-616.15 показал более низкие затраты в части снижения себестоимости механизированных работ на 14%. Это способствовало получению приведенного экономического эффекта в сумме 100671,6 руб. Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений при внедрении регулятора жесткости в стойку не превышает 0,28 года.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе анализа работы отечественных и зарубежных комбинированных культиваторов выявлено влияние подвески и крепления рабочих органов на тяговые и агротехнические показатели. Установлено, что в конструкцию упругой стойки для работы в широком диапазоне почвенных условий целесообразно предусмотреть регулятор жесткости. Предложена конструкция регулятора жесткости упругой S-образной стойки (патент на полезную модель № 132940).

2. Получены дифференциальные уравнения движения рабочего органа на упругой стойке: динамическая модель колебаний (10), модель формы колебаний (12)

и модель колебаний носка лапы рабочего органа на упругой стойке (15). Они позволяют решать широкий круг задач статики и динамики упругой стойки как системы с распределенными параметрами: определить формы колебаний, отклонение носка лапы от первоначального положения и способы регулирования жесткости стойки.

3. Исследован характер процесса взаимодействия рабочего органа на упругой стойке с обрабатываемой средой в зависимости от жесткости стойки с помощью программы АРМ FEM. Определены закономерности его перемещения: при нагрузке 500 Н и стандартной форме закрепления по оси OX наблюдаются наибольшие перемещения - 0,066 м (собственная частота колебаний 20,37 Гц); по оси OZ - 0,032 м (собственная частота колебаний 29,24 Гц); по оси OY самые незначительные - 0,0002 м (при собственной частоте колебаний 57,76 Гц).

4. На основе экспериментальных результатов установлено, что увеличение жесткости стойки с 6826 Н/м (стандартная) до 14320,5 Н/м позволяет ее использовать на глубине до 5 см с соблюдением агротехнических требований, а увеличение до 21815 Н/м - до 10,5 см. При этом увеличение жесткости стойки с 6826 Н/м до 21815 Н/м приводит к снижению тягового сопротивления агрегата при глубине обработки 4 см на 4,38 кН (35%); 8 см - 7,3 кН (24%); 12 см - 9,49 кН (19%), улучшению качества крошения почвы и уменьшению гребнистости.

5. Полевые исследования культиватора ИМТ-616.15 с упругими стойками, оснащенными регуляторами жесткости, показали снижение себестоимости механизированных работ на 14%. Годовой экономический эффект от внедрения регулятора жесткости упругой стойки равен 100671,6 руб., а срок окупаемости дополнительных капитальных вложений не превышает 0,28 года.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Федоров С. Е. Моделирование пружинных стоек комбинированных культиваторов / С. Е. Федоров, М. Н. Чаткин, А. С. Костин, С. Ю. Городсков // Тракторы и сельхозмашины. - 2013. - № 8. - С. 41 - 44 .

2. Федоров С. Е. Исследование упругой S-образной стойки комбинированного культиватора / С. Е. Федоров, М. Н. Чаткин, А. С. Костин, Н. В. Колесников // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. - 2015. № 3. - С. 12 - 15.

3. Федоров С. Е. Определение деформаций упругих стоек культиватора / С. Е. Федоров, А. С. Костин, М. Н. Чаткин // Сельский механизатор. - 2015. - №10. - С. 18 - 19.

Патенты

4. Патент на полезную модель № 132940 РФ, МПК А01В 35/24. Культиватор на упругих стойках. / Чаткин М. Н., Федоров С. Е., Костин А. С.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарева». - 2013120755/13; заявл. 06.05.2013; опубл. 10.10.2013, бюл. № 28.

Публикации в сборниках научных трудов и материалах конференций

5. Седашкин А. Н. Влияние вынужденных колебаний на разрушение почвы / А. Н. Седашкин, С. Е. Федоров, С. Ю. Городсков // Энергоэффективные и ресурсо-

сберегающие технологии и системы: межвуз. сб. науч. тр. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. 2010. – С. 51–54.

6. Чаткин М. Н. Обзор современных энергосберегающих технологий обработки почвы / М. Н. Чаткин, О. А. Ягин, С. Е. Федоров // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвуз. сб. науч. тр. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. 2010. – С. 40–43.

7. Чаткин М. Н. Обоснование параметров пружинных стоек комбинированных культиваторов / М. Н. Чаткин, С. Е. Федоров // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции: IX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию со дня рождения и памяти докт. с.-х. наук, профессора С. А. Лапшина. Ч. 2. - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. 2013. – С. 371–376.

8. Федоров С. Е. Исследование динамики пружинной стойки методом «эквивалентного бруса» / С. Е. Федоров, М. Н. Чаткин // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвуз. сб. науч. тр. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. 2013. – С. 66–68.

9. Федоров С. Е. Обоснование параметров пружинных стоек комбинированных культиваторов / С. Е. Федоров, М. Н. Чаткин, А. С. Костин // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сб. науч. тр. Междунар. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 547–550.

10. Федоров С. Е. Классификация и анализ автоколебаний рабочих органов культиваторов / С. Е. Федоров, М. Н. Чаткин, А. С. Костин // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сб. науч. тр. Междунар. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 550–552.