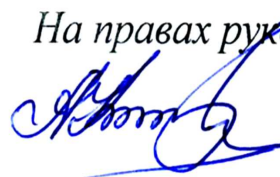


На правах рукописи



КОТЕЛЬНИКОВ Антон Владимирович

**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ
ШТАНГОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО
«Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ)»

Научный руководитель

Серебровский Вадим Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики и прикладной математики ФГБОУ ВПО «ЮЗГУ»

Официальные оппоненты:

Бартенев Иван Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия»;

Василенко Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной механики ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра 1»

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Курская государственная сельскохозяйственная академия имени профессора И.И. Иванова

Защита состоится 29 января 2015 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.010.04 при ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра 1» по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ВГАУ» 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=1216>.

Автореферат разослан 19 декабря 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 220.010.04,
доктор технических наук, профессор



Афоничев
Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Перспективы развитие механизации обработки почвы с параметрами энергосбережения, экологической безопасности машин и технологий, охраны окружающей среды и человека основаны на трудах В.П. Горячкина, В.А. Желиговского, М.В. Сабликова, П.У. Бахтина, В.В. Василенко, П.М. Василенко, И.П. Ксеновича, И.М. Панова, В.П. Иванова, Я.П. Лобачевского, И.М. Бартенева, В.Е. Шевченко, Бура, Чайлдса, Гетти и других ученых в нашей стране и за рубежом.

Зарубежные страны интенсивно и широко внедряют экологически чистые технологии и машины в фермерских хозяйствах. Однако проблема совершенствования средств механизации для экологически безопасной энергосберегающей технологии в настоящее время остается весьма актуальной и имеет важное народно-хозяйственное значение. Для механизации экологически безопасной обработки почвы под основные зерновые и пропашные сельскохозяйственные культуры в настоящей работе предложены, обоснованы и рекомендуются промышленному производству и АПК энергосберегающие циклоидальные рабочие органы.

Степень разработанности. Общим вопросам энергосбережения и экологической безопасности технологий в земледелии посвящены работы В.П. Горячкина, В.А. Желиговского, П.У. Бахтина, И.М. Бартенева, А.И. Тимофеева, В.В. Василенко, В.Ф. Федоренко Я.П. Лобачевского, Н.В. Краснощекова, А.К. Нанаенко, А.В. Шпилько, П.Н. Бурченко, В.П. Елизарова, И.М. Панова, Г.Н. Синеокова, Ю.И. Кузнецова, Л.С. Орсика, В.П. Иванова, В.Е. Шевченко, А.П. Спирина, А.Ф. Жука и других ученых в нашей стране и за рубежом. Решены ряд теоретических и прикладных задач в этой области И.К. Макарецом, А.В. Котельниковым, В.Ф. Довгалем, М.Н. Жердевым, А.В. Рыжковым, А.Л. Брежневым, Д.В. Мотиным и другими. Вопросы использования экологически безопасной энергосберегающей технологии по патентам RU № 2474100, RU№2475007, 2013 г. «Способ выращивания сельскохозяйственных культур по экологически чистой энергосберегающей технологии» и «Энергосберегающая почвообрабатывающая стойка» с циклоидальными рабочими контурами сдерживаются отсутствием теоретически и экспериментально обоснованных рекомендаций и в настоящей работе ставятся нами на исследование впервые. На этой основе во введении сформулирована основная цель и задачи исследования.

Объект исследования – комплекс циклоидальных и роторно-прутковых рабочих органов для энергосберегающей обработки почвы.

Предмет исследования – определение закономерностей процесса функционирования циклоидальных и роторно-прутковых рабочих органов.

Цель работы – снижение затрат энергии и средств на обработку почвы и уничтожение сорняков новыми способами и техническими средствами.

Задачи исследования:

- обосновать параметры и режимы послойного трения и смещения фракций активного слоя почвы боковой поверхностью штанги при её поступательном движении и вращении прутьев ротора по удлинённой трохойде для извлечения проростков сорняков на поверхность почвы;
- определить рациональные конструктивные параметры роторно-пруткового рабочего органа по борьбе с проростками сорняков;
- выявить рациональную форму циклоидальной лобовой поверхности стоек почвообрабатывающих органов, снижающую их тяговое сопротивление, и обосновать конструктивные параметры;
- разработать методику графо-аналитического расчета исследуемых рабочих органов;
- провести испытания циклоидальных и роторных рабочих органов, определить экономическую эффективность и внедрить их в производство.

Научная новизна исследования:

- обоснованы закономерности процесса послойного трения в активном слое почвы при движении штанги в сыпучей среде, отличающиеся получением зависимостей скоростей и перемещений разноудалённых от штанги слоёв;
- доказано преимущество циклоидальной формы лобовой поверхности стоек почвообрабатывающих органов перед другими типами кривых в снижении тягового сопротивления и определены их конструктивные параметры;
- предложены и конструктивно разработаны принципиально новые ротационные штанговые рабочие органы для поверхностного рыхления почвы и борьбы с проростками сорняков, а также циклоидальные стойки рабочих органов с уменьшенным тяговым сопротивлением.

Методы исследования

В работе использован механико-математический аппарат детерминистской теории и анализа применительно к оценке и моделированию рабочих процессов обработки почвы.

Научные положения, выносимые на защиту:

- теоретическое и экспериментальное обоснование процесса послойного трения и смещения фракций в активном слое почвы при движении штанги в сыпучей среде и эффект выноса на поверхность почвы проростков сорняков;
- доказательство преимуществ циклоидальных стоек в снижении тягового сопротивления при обработке почвы;
- конструктивная реализация результатов исследований в создании и внедрении в производство новых почвообрабатывающих орудий.

Реализация результатов исследования

Результаты исследований внедрены в практику земледелия АПК, а разработанные методика расчета, технические задания и агротехнические требования на циклоидальные рабочие органы для экологически безопасной технологии обработки почвы переданы Белгородскому ОАО «Белагромашсервис», Грязинскому культиваторному заводу, Орловскому заводу им. Медведева для промышленного освоения и производства новой техники.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы доложены и одобрены на научно-практических конференциях Юго-Западного государственного университета в 2011-2013 гг, на кафедре сельхозмашин Воронежского аграрного университета в сентябре 2013 г., на Грязинском культиваторном заводе в ноябре, апреле, марте, июле 2012-2013 гг, в ОПХ института рапса в Липецкой области в августе 2013 г., в АПК администрации Орловской и Белгородской областей в апреле 2014 г., на ЦЧ МИС в июне 2012, мае 2013 г., на кафедре ЮЗГУ в сентябре 2013 г., на семинаре в институте рапса Липецкой области в мае 2014 года.

Личный вклад автора заключается

- в механико-технологическом обосновании циклоидальных рабочих органов;
- в построении математической модели послойного трения и движения фракций в активном слое почвы;
- в разработке методики графоаналитического расчета и проектирования циклоидальных контуров стоек энергосберегающих культиваторов, зубьев сепарирующих роторов;
- в разработке конструкций орудий, их рабочих органов и оформлении заявок на изобретения;
- в разработке агротехнических требований, технических заданий на новую технику для трех заводов сельскохозяйственного машиностроения.

Из общего объема опубликованных работ 35,7 п. л. вклад автора изложен на 25,4 п.л.

Публикации. По материалам исследований в печати опубликовано 14 научных работ, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 статей, 2 монографии (одна монография без соавторов), 4 патента на изобретения и две работы в прочих изданиях.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа содержит 159 страниц основного текста, 100 рисунков, 31 таблицу и приложения. Библиографический список включает в себя 183 наименования работ отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении даётся обоснование актуальности темы исследования, дана формулировка цели работы и научных положений, которые вынесены на защиту, представлена новизна научных исследований, их практическая значимость, результаты внедрения.

В первом разделе «Научно-производственные предпосылки создания циклоидальных рабочих органов для обработки почвы» приведен литературный обзор рабочих контуров машин от исторического прошлого до настоящего времени. Даны свойства циклоидального брахистохронного контура стойки. Задача о брахистохроне, то есть о линии быстрейшего ската и подъема, интересовала ученых и изобретателей давно начиная с Галилея, и нашла свое положительное решение в дальнейших научных исследованиях Якоба и Иоганна Бернулли, Ферма, Христиана Гюйгенса, Смирнова, Понтрягина и др. Получена замечательная кривая – циклоида. Научные результаты решения задачи на экстремум о движении точки по траектории с минимальным временем были использованы в циклоидальном маятнике Гюйгенса, циклоидном зацеплении шестерен, а нами – в рабочих контурах новых сельскохозяйственных машин. Как показали последующие испытания, эти контуры подтверждают замечательные свойства циклоиды и являются энергосберегающими, поскольку известная теория Бернулли, Ферма, Христиана Гюйгенса, Смирнова, Понтрягина и других дает этому убедительные доказательства и основания. Но энергосберегающие свойства циклоиды применены нами не в чистом виде по известной теории, а изменены, переработаны и адаптированы применительно к обоснованию параметров почвообрабатывающих машин с учетом физико-механических свойств и технологических задач обработки почвы. Как показали испытания, циклоиду можно использовать в земледельческой механике по энергосберегающей экологически безопасной технологии.

В теоретическом плане выявлены отличительные свойства циклоиды, используемые в дальнейшем для проектирования новых рабочих органов, сформулирована цель и задачи исследования.

Во втором разделе «Исследование и обоснование механико-технологических параметров циклоидальных рабочих органов» представлены теоретические обоснования процесса взаимодействия роторно-прутковых органов с почвой с целью поверхностного рыхления и извлечения проростков сорняков на поверхность поля и проведено теоретическое исследование работы циклоидальных стоек почвообрабатывающих органов с целью снижения их тягового сопротивления. Эти два направления исследований объединены тем, что в роторно-прутковом цилиндрическом орудии каждый пруток закреплён в двух циклоидальных стойках, но стойки также могут применяться в качестве долотообразных рабочих

органов в щелерезах, культиваторах, чизелях и других орудиях. В этих стойках может быть вставлено два горизонтальных консольных отрезка штанги для расширения зоны рыхления нижнего слоя почвы.

При движении роторно-пруткового рыхлителя со скоростью $v_{рых}$ (рисунок 1) передний ротор через цепную передачу 3 притормаживает вращение заднего ротора так, чтобы прутки 6, вставленные в циклоидальные стойки 4, двигались по удлинённой трохойде, рыхлили почву и выбрасывали проростки сорняков на поверхность почвы. Сверху и снизу от прутка образуется активный слой почвы толщиной x_a (рисунок 2) со своими скоростями, убывающими по мере удаления от прутка (или штанги). Частицы почвы, контактирующие с прутком, имеют скорость прута v_a .

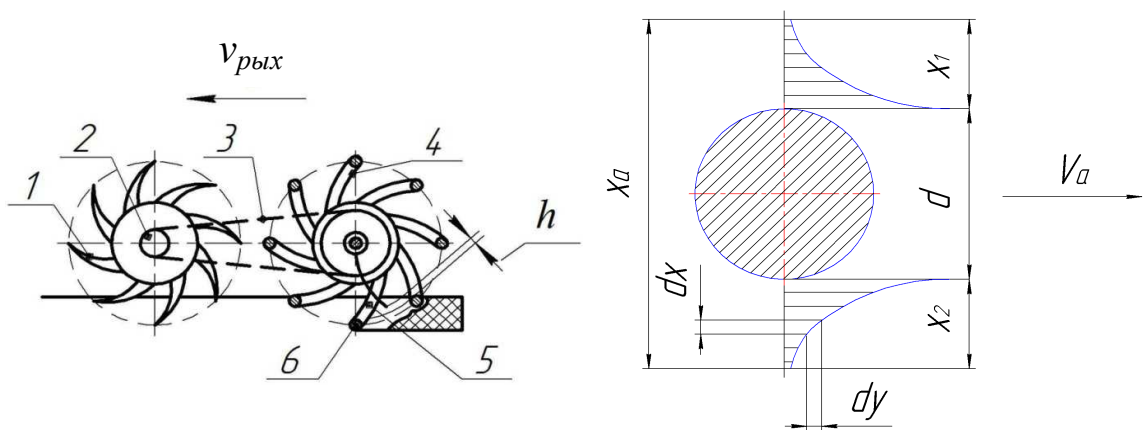


Рисунок 1 – Схема роторно-пруткового рыхлителя

Рисунок 2 – Скорости почвенных частиц в активном слое

Удалённые от прутка на расстояние x частицы имеют скорости v , которые можно определить по дифференциальному уравнению

$$\frac{dv}{dx} = -kv, \quad (1)$$

где k – градиент затухания скорости, по опытным данным $k = 0,27$. Решением этого уравнения является выражение

$$v = v_a e^{-kx}. \quad (2)$$

Экспериментально определена толщина активного слоя почвы для частиц диаметром от 2 до 10 мм, она аппроксимируется уравнением

$$X_a = 2,25 \cdot (d - 2) + 19. \quad (3)$$

Поскольку удаление x слоёв почвы от штанги является непрерывной величиной, а номера слоёв носят дискретный характер, для удобства анализа перемещений почвы можно разграничить величину x на отрезки и пронумеровать эти отрезки. В дальнейшем под индексом s будем подразумевать номер слоя, начиная от контактирующего со штангой. Если скорость v_a прута принять равную 1, то промежуточные значения скоростей

v почвенных частиц в активном слое можно заменить значениями перемещений S в долях единицы, имеющих такую же безразмерную функциональную закономерность смещения почвенных слоев, что и скорость в уравнении (2). Тогда

$$v_a = S_a = 1, \quad (4)$$

а относительная дальность перемещения каждого слоя с порядковым номером c определяется показательным уравнением

$$S = e^{-kc}. \quad (5)$$

Теоретическая и экспериментальная кривые перемещения слоёв показаны на рисунке 3.

Конструктивные параметры роторно-пруткового рыхлителя должны обеспечивать рыхление почвы на заданную глубину, чаще это глубина заделки семян при предстоящим посевом, выравнивание поверхности почвы и выбрасывание проростков сорняков на дневную поверхность. Эффективность выбрасывания сорняков, или сепарации их от почвы, зависит от их длины, диаметра прутков, коэффициента трения проростков по рабочей поверхности и угла обхвата (рисунок 4). Если давать оценку сепарирующей способности по объему сепарирования, то увеличение диаметра прута способствует улучшению процесса сепарации и разделения сорняков и



Рисунок 3 – Смещение слоёв почвы при движении прута или штанги

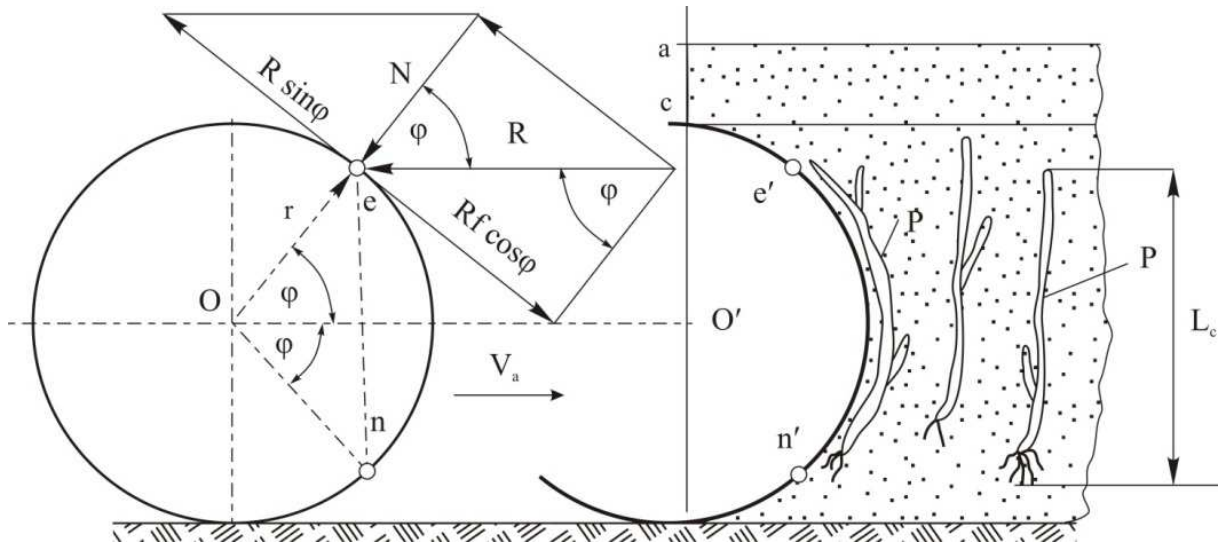


Рисунок 4 – К обоснованию диаметра прута

фракций. Вместе с тем увеличение диаметра прута ротора ухудшает его заглубление в почву. Поэтому необходимо установить соотношение между трением сорняков по поверхности прутков, длиной проростков и диаметром сепарирующих элементов. По условиям технологии, сорняки целесообразно сепарировать без разрушения и разрыва растений на части, чтобы исключить возможность дальнейшего их вегетативного размножения разорванных частей растений, особенно пырея.

Векторный анализ сил, действующих на сорняк, показывает, что он не должен соскальзывать с прута, а удерживаться на нём за счёт силы трения. Для этого должно соблюдаться равенство

$$d_n = \frac{L_c}{\varphi_0}, \quad (6)$$

где d_n – диаметр прута;

L_c – длина проростков сорняков;

φ_0 – угол трения сорняка о пруток, *рад*.

Таблица 1 – Рациональный диаметр прута рыхлителя, мм

Длина проростков. мм	Угол трения φ_0 , град.				
	20	30	40	50	60
5	14,3	9,0	7,1	5,7	4,8
10	28,6	18,1	14,3	11,4	9,6
20	57,2	36,2	28,6	22,8	19,2
30	85,9	54,1	42,8	34,2	28,8

Рациональная траектория движения прутьев по удлинённой трохойде, которая реализует выдёргивание сорняков и создание семенного ложа

для предстоящего посева, обеспечивается путём притормаживания заднего, сепарирующего ротора. Коэффициент скольжения $\delta_{ск}$ зависит от передаточного отношения i цепной передачи:

$$\delta_{ск} = 1 - i^{-1} \quad (7)$$

Экспериментально установлено, что наиболее качественное уничтожение и сепарация сорняков, а также выравнивание поверхности поля достигается при передаточном отношении приводных звездочек заднего ротора к переднему от 2 до 4 и скорости движения агрегата не менее 8,1 км/ч, что соответствует коэффициенту скольжения от 0,5 до 0,75 (рисунок 5).

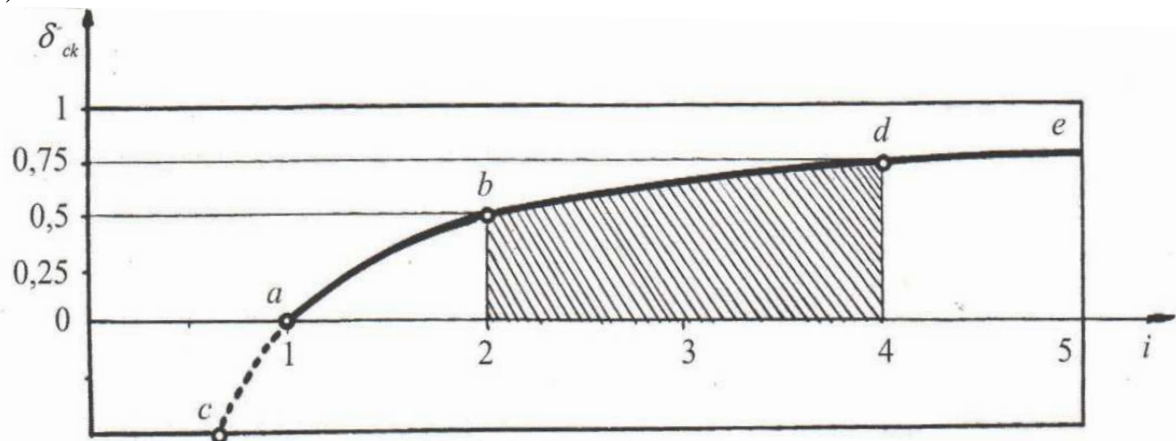


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента скольжения ротора от передаточного отношения

Диаметр ротора и число прутьев подбираются по анализу траекторий двух смежных прутьев таким образом, чтобы высота «у» точки пересечения траекторий над дном борозды не превышала допуска на неравномерность глубины заделки семян пропашных культур (рисунок 6):

$$y \leq \Delta h \cong \pm 1 \text{ см.}$$

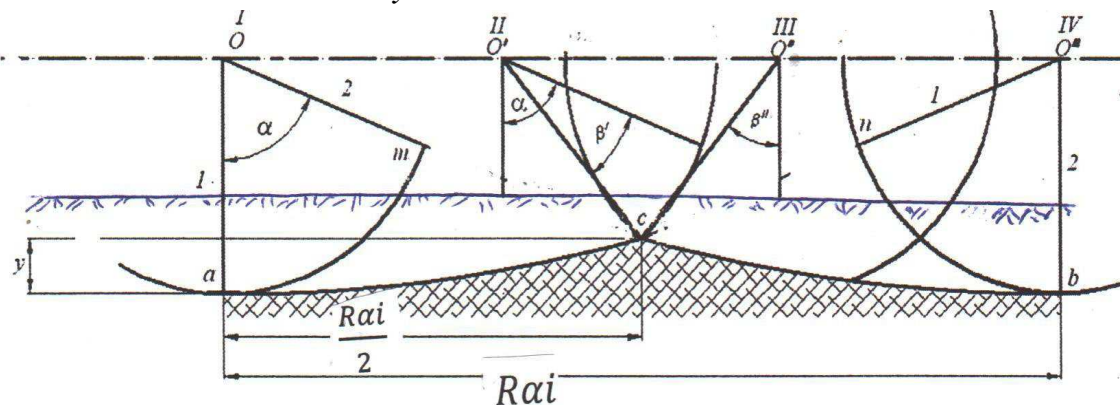


Рисунок 6 – Формирование остаточных гребешков высотой y на дне борозды

При глубоком рыхлении почвы $H_{max} \approx 60$ см циклоидальной стойкой всю глубину обработки можно разграничить на три участка (рисунок 7):

$$H_{max} = h_I + h_{II} + h_{III}. \quad (8)$$

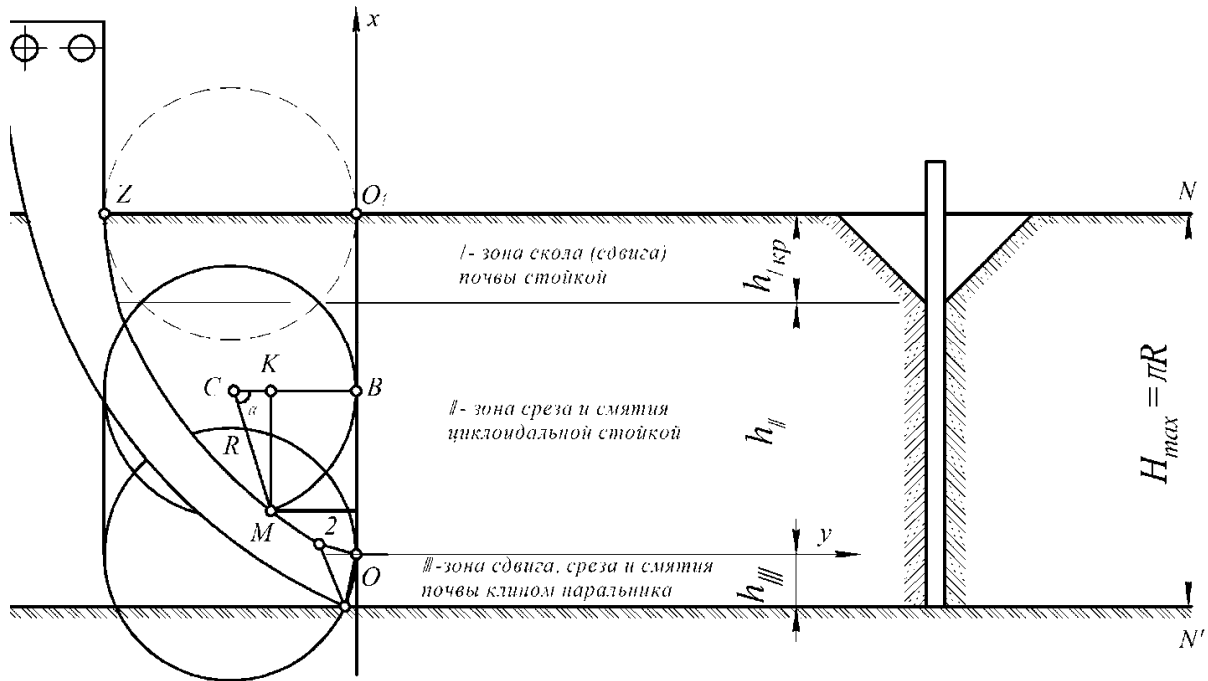


Рисунок 7 – Три зоны лобовой поверхности стойки

Верхний участок – это зона бокового скола на глубину 0-15 см. Средний участок – зона работы циклоидального контура стойки (15-50 см). Нижний участок – зона работы плоского клина-наральника (до 50-60 см). В настоящей работе оптимизируется форма рабочей поверхности среднего участка стойки, поскольку первый и третий участки одинаковы для всех типов стоек. Их суммарная доля от силы сопротивления стойки составляет 65-70%. Полное тяговое сопротивление различных стоек зависит от кривизны средней зоны h_{II} . Поэтому для сравнения сил тягового сопротивления выбраны стойки с разными радиусами ρ кривизны (логарифмического, радиального, параболического, циклоидального) рабочих контуров.

Верхний участок h_I у всех типов стоек одинаков, он расположен вертикально, вдоль него нет скольжения почвы, и его сила сопротивления определяется по известному выражению – произведению площади контакта на твёрдость почвы:

$$P_I = p_I \cdot b \cdot h_I, \quad (9)$$

где p_I – твёрдость почвы в первой зоне обработки, Н/см²;

b – ширина стойки, см;

h_I – высота первой зоны, см.

Нижний участок h_{III} имеет форму простого двугранного клина с углом подъёма $\alpha_{III} < 90^\circ - \varphi$, где φ – угол трения. По аналогии с углом постановки плужного лемеха к дну борозды, рекомендованным академиком В.П. Горячкиным, угол подъёма наральника принят равным 30° , что обеспечивает ему скольжение почвы по рабочей поверхности и, следовательно, снижение тягового сопротивления:

$$P_{III} = p_{III} \cdot b \cdot h_{III} \cdot \sin \alpha_{III}, \quad (10)$$

где P_{III} – сила сопротивления третьего участка стойки;

p_{III} – твёрдость почвы на третьем участке;

h_{III} – высота третьего участка.

Средний участок h_{II} криволинеен, угол подъёма α_{II} переменный, но везде $\alpha_{II} < 90^\circ - \varphi$, то есть почва скользит по всему участку. Пласт вписывается в циклоидальную форму стойки, изгибается, в результате чего в его толще возникают напряжения растяжения и сжатия (рисунок 8).

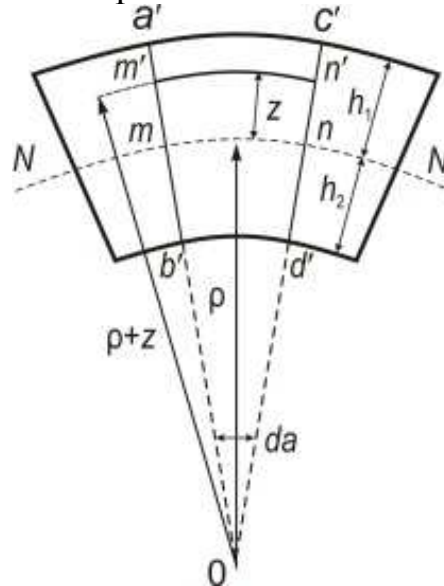


Рисунок 8 – Изгиб пласта на втором участке стойки

Элементарный отрезок нейтральной дуги NN выражается через радиус кривизны и центральный угол:

$$ds = \rho \cdot d\alpha, \quad (11)$$

а отрезок дуги на удалении z от нейтральной линии равен

$$m'n' = (\rho + z) \cdot d\alpha. \quad (12)$$

Относительное удлинение ε волокна mn определяется как

$$\varepsilon = \frac{m'n' - mn}{mn} = \frac{(\rho + z) \cdot d\alpha - \rho \cdot d\alpha}{\rho \cdot d\alpha} = \frac{z}{\rho}, \quad (13)$$

а напряжение растяжения и сжатия в обрабатываемом пласте почвы можно считать удельным сопротивлением, действующим на лобовую проекцию циклоидального участка стойки, которое при условии скольжения пласта зависит от твёрдости почвы и угла подъёма рабочей поверхности аналогично выражению (10):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{P_{II}}{S_{II}} = p_{II} \cdot \sin \alpha_{II}, \quad (14)$$

где E – модуль Юнга;

P_{II} – сила сопротивления второго участка стойки;

p_{II} – твёрдость почвы на втором участке;

S_{II} – площадь сечения пласта в пределах второго участка;

α_{II} – средний угол подъёма второго участка стойки.

Преобразовав выражение (14), имеем

$$P_{II} = E \cdot \frac{S_{II} \cdot z}{\rho} = p_{II} \cdot b \cdot h_{II} \cdot \sin \alpha_{II}, \quad (15)$$

откуда можно заключить, что сила сопротивления криволинейного участка стойки обратно пропорциональна его радиусу кривизны. У циклоидальной стойки и, допустим, параболической, он соотносятся как

$$\frac{\rho_{цик}}{\rho_{пар}} = \frac{P_{цик}}{P_{пар}} = \frac{\rho_{пар}}{\rho_{цик}}. \quad (16)$$

Результаты расчёта приведены в таблице 2.

В третьем разделе «Методика экспериментальных исследований» приведено описание лабораторного стенда с подвесным почвенным каналом длиной 35 м и движущейся тележкой со скоростями от 4 до 11 км/ч, оснащённого регистрирующей аппаратурой. На нём изучалось формирование активного слоя почвы при прохождении горизонтальной штанги или прутка. В полевых условиях проводились опыты на ЦЧ МИС по отраслевым методикам СТО АИСТ 4.1-2010 «Машины и орудия для глубокой обработки почвы» и М-2011 СТО АИСТ 4.2-2010 «Машины и орудия для поверхностной и мелкой обработок почвы». Объектами испытаний были серийно выпускаемые Грязинским культиваторным заводом почвообрабатывающие орудия с экспериментальными рабочими органами. Производственную проверку эти орудия проходили в ОПХ института рапса в Липецкой области, в хозяйствах «Прогресс» и «Русь» Курской области. Математическая обработка полученных данных заключалась в определении числовых характеристик измеряемых показателей и определении точности опыта.

Таблица 2 – Расчёт силы сопротивления стоек

Параметры		Профиль стойки			
		Логарифмический	Радиальный	Параболический	Циклоидальный
Радиус кривизны ρ , см		29,6	31	34	38
Относительное изменение кривизны, %		28,9	22,4	11,7	0
Напряжение сжатия почвы по горизонтам глубины, σ , Н/см ²	I	35,0	35,0	35,0	35,0
	II	77,2	73,7	67,2	60,1
	III	47,0	47,0	47,0	47,0
Сила сопротивления стойки P , Н		7427	7176 (7800)*	6708	6199 (5480)*
Увеличение силы сопротивления, %		19,8	15,8	8,2	0

*) – по данным МИС

В четвёртом разделе «*Результаты экспериментальных исследований и внедрение циклоидальных рабочих органов в производство*» выявлено, что рациональный диаметр прутьев на сепарирующем роторе зависит от длины проростков сорняков и равен 15-35 мм. Толщина активного слоя почвы по обе стороны от движущейся штанги или прутка диаметром 25 мм изменяется от 19 до 37 мм соответственно для частиц почвы от 2 до 10 мм с градиентом перемещения слоёв соответственно от 0,11 до 0,27, что не противоречит теоретическим представлениям. После прохода сепарирующего ротора абсолютное большинство проростков сорняков оказывается на дневной поверхности. Полученные энергетические показатели подтверждают, что затраты мощности на одну секцию сепарирующего ротора шириной захвата 1,4 м увеличиваются от 11,9 до 25,2 кВт при увеличении скорости агрегата от 7,2 до 12,9 км/ч (рисунок 9).

Тяговые испытания различных типов стоек показали преимущество циклоидальных стоек (рисунок 10). С увеличением скорости движения агрегата от 7,2 до 13 км/ч сопротивление циклоидальной стойки увеличивается на 33%, радиальной – на 41%, прямолинейной – на 46%.

По агротехническим показателям сепарирующие роторы соответствуют требованиям для предпосевной обработки почвы. На предпосевной подготовке почвы под озимые культуры на зяби и парах массовая доля комков размером до 10 мм составила 96%, а размером 10-20 мм – 4%. Глубина обработки составила 7,5 см.

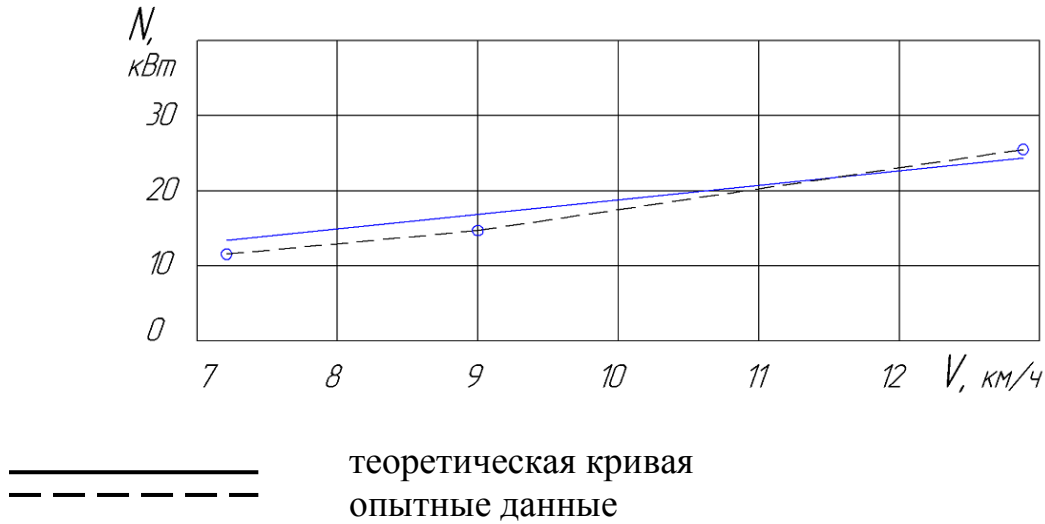


Рисунок 9 – Затраты мощности ротационным рыхлителем ПАРК-6 шириной захвата 1,4 м

Агротехническая оценка циклоидальных стоек оказалась тоже удовлетворительной. Так например, стойки щелереза-глубокорыхлителя, установленные на раме плуга ПН-4-35, при работе по стерневому фону на глубину 43 см показали среднюю гребнистость почвы 3,9 см, крошение почвы до размера фракций 5 см составило 87%, сохранение стерни 88%.

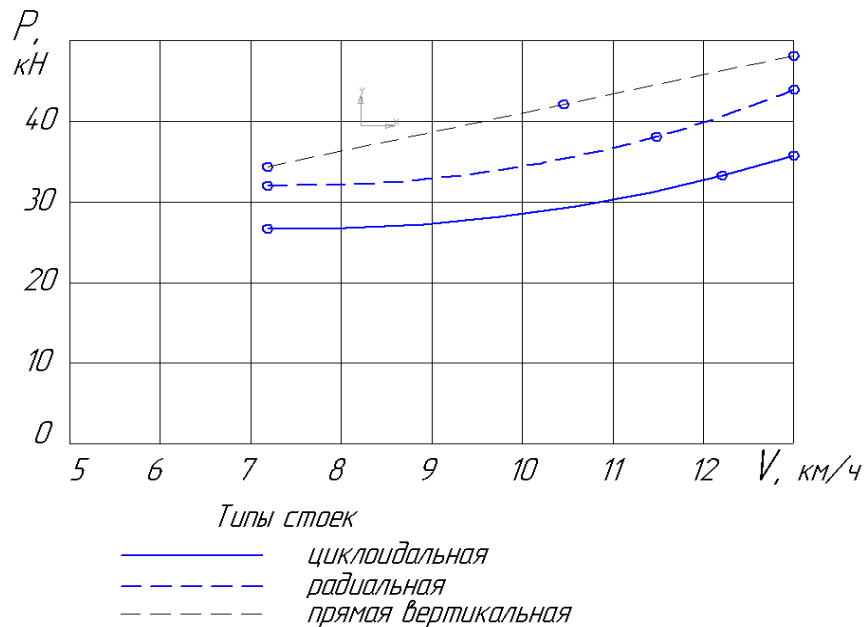


Рисунок 10 – Сила сопротивления щелереза на раме плуга ПН-4-35 с различным типом стоек (теоретические кривые и опытные данные)

На рисунках 11 и 12 показаны некоторые из агрегатов, оборудованных циклоидальными стойками, на полевых испытаниях.



Рисунок 11 – Агрегат для минимальной обработки почвы



Рисунок 12 – Глубокорыхлители на раме культиватора и плуга

В пятом разделе *«Методика графоаналитического расчёта циклоидальных рабочих органов и построения их конструктивных схем»* предложен порядок расчёта роторного рыхлителя-сепаратора с циклоидальными зубьями. Расчёт состоит из 15 пунктов последовательных вычислений конструктивных и режимных параметров орудия по предложенным теоретическим зависимостям.

В этом же разделе предложен также порядок графоаналитического построения циклоидальных стоек с рациональными параметрами, выявленными в результате исследований. Для построения лобового контура стойки сначала вычисляется радиус круга, производящего циклоиду:

$$R = H_{\max} \cdot \pi^{-1}. \quad (17)$$

Для глубины обработки до 32 см рекомендуемым радиусом является $R = 11$ см. Выбирается участок циклоиды с углами поворота радиуса производящего круга от 60 до 120° . Этот участок вычерчивается в системе координат по рисунку 13 с такой ориентацией, чтобы угол подъема в точке сопряжения с наральником был равен $\varepsilon = 30^\circ$, а в точке перехода к вертикальной части (первому участку) – 60° . Для обработки почвы на глубину до 10-12 см требуется стойка с одной циклоидой высотой 12 см (одноконтурная стойка). Для обработки до 24 см необходимо два отрезка циклоиды (двухконтурная стойка), для больших глубин требуются многоконтурные стойки (рисунок 14).

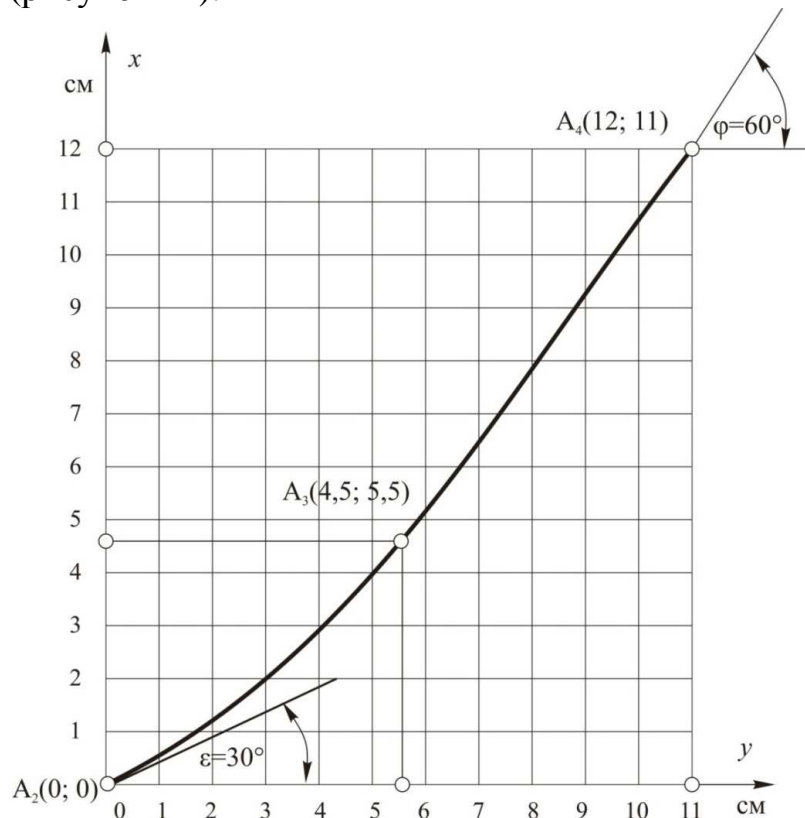


Рисунок 13 – Построение циклоидального участка рабочей поверхности стойки

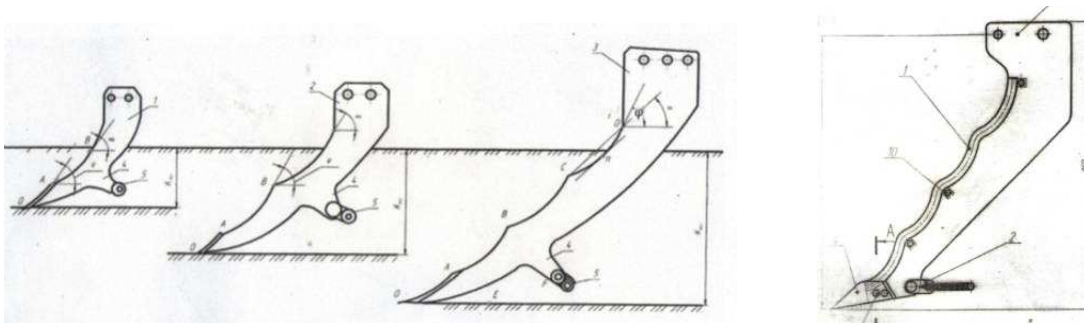


Рисунок 14 – Варианты циклоидальных стоек

В шестом разделе «Экономическое обоснование целесообразности разработки циклоидальных рабочих органов» определены показатели экономической эффективности циклоидальных стоек при безотвальной обработке почвы на примере агрегата Т-150К+ПН-4-35 с этими стойками (таблица 3).

Таблица 3 – Показатели эффективности опытного агрегата

Показатели	Значение показателей
Срок эксплуатации проекта, год	9
Инвестиционные вложения, тыс. руб.	93,65
в т.ч.: в основные средства, тыс. руб.	93,65
Годовой экономический эффект, тыс. руб.	148,80
Экономический эффект за срок реализации проекта, тыс. руб.	2 199,00
Цена спроса на комплекс ресурсов для реализации проекта, тыс. руб.	792,98
Коэффициент эффективности капитальных вложений	0,42
Срок окупаемости, год	0,7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общие выводы

1. Новый способ экологически чистой борьбы с сорняками и предпосевной обработки почвы заключается в применении заторможенного пруткового цилиндрического ротора, прутки которого движутся по удлиненной трохойде, рыхлят почву на глубину 7 ... 15 см, полностью выравнивают поверхность поля и извлекают проростки сорняков на дневную поверхность.

2. Основной характеристикой технологического процесса ротационных циклоидальных рыхлителей является режим скольжения прутьев, который характеризуется коэффициентом скольжения, зависящим от передаточного отношения тормозящей цепной передачи, его рациональное значение – 0,5 ... 0,75.

3. При движении горизонтальной штанги или прутка в рыхлом горизонте силами трения формируется активный слой почвы, в котором скорость послойного смещения почвенных фракций убывает по закону показательной функции $v=v_a \cdot e^{-k \cdot c}$ с градиентом затухания скорости $k = 0,27$. Максимальная толщина активного слоя для частиц диаметром от 2 до 10 мм изменяется соответственно от 19 до 37 мм.

4. Рациональный диаметр прутьев у цилиндрического сепарирующего ротора зависит от длины проростков сорняков и их коэффициента трения о прутки; в большинстве случаев он должен быть равен 15 ... 25 мм.

5. Высота остаточных гребешков при обработке почвы сепарирующим ротором является основным аргументом при выборе диаметра ротора и числа прутьев, так как остаточные гребешки ухудшают равномерность глубины заделки семян при предстоящем посеве.

6. При сравнительно низких окружных скоростях приторможенных рабочих органов (1,5 ... 2 м/с) высокое качество предпосевной обработки почвы достигается увеличением поступательной скорости агрегата; предельно низкая скорость должна быть не менее 8 км/ч. Верхний предел скорости движения агрегата качественными показателями технологического процесса не ограничен.

7. Технологическое воздействие циклоидального контура стойки на вертикальный слой почвы включает три зоны:

- первая зона, или верхний участок на глубину от нуля до 15 см, где происходит боковой скол почвы;
- вторая зона, или средний участок на глубину от 15 до 45 ... 50 см, где происходит скольжение пласта с изгибом по контуру стойки;
- третья зона, или нижний участок на глубину от 45 до 50 или от 50 до 55 см, где работает наральник в виде плоского двугранного клина.

8. В соответствии с глубиной обработки почвы на втором участке стойки (30 ... 35 см) радиус окружности, образующей циклоиду, равен 11 см; при угле вхождения в почву 30° угол поворота радиуса образующей окружности равен 60° и средний радиус кривизны в циклоидальной зоне стойки равен 38 см.

9. Одна циклоидальная стойка со штангой при работе на глубину 38 ... 43 см показала тяговое сопротивление в среднем 6,87 кН, что на 15,5% меньше, чем у радиальной, и на 24% меньше, чем у прямолинейной вертикальной стойки. С увеличением скорости движения агрегата от 7,2 до 13,0 км/ч сопротивление циклоидальной стойки увеличивается на 33%, радиальной – на 41% и прямолинейной – на 46%.

10. Метод графоаналитического построения контура циклоидальной стойки основан на использовании участка циклоиды с углами поворота радиуса образующей окружности от 60° до 120° .

11. Расчёт экономической эффективности производства и применения почвообрабатывающих орудий с вновь созданными рабочими органами подтверждает целесообразность их промышленного производства и использования в растениеводстве. Срок окупаемости дополнительных капиталовложений на изготовление и внедрение циклоидальных почвообрабатывающих стоек не превышает одного года.

Рекомендации производству

Выполненные исследования позволяют рекомендовать сельскохозяйственному производству новую энергосберегающую экологически безопасную технологию обработки почвы, а заводам сельскохозяйственного

машиностроения – конструктивные схемы машин и орудий, методы их расчета и проектирования.

Для построения оптимальной формы энергосберегающей стойки и зуба ротационного рыхлителя конструкторам заводов сельскохозяйственного машиностроения предложена методика графоаналитического расчета и проектирования контура циклоиды и комбинирования различного числа контуров на одной стойке в соответствии с предполагаемой глубиной обработки почвы проектируемым орудием.

Результаты исследований защищены патентами РФ, и производству предложены новые способы обработки почвы и технические решения энергосберегающих рабочих органов циклоидального типа (патенты на изобретения №№ RU 2474100, RU2475007, 2013 г. «Способ выращивания сельскохозяйственных культур по экологически чистой энергосберегающей технологии», «Энергосберегающая почвообрабатывающая стойка». Грязинский культиваторный завод (Липецк), Белгородагрош-сервис (Белгород), завод им. Медведева (Орел) приступили к оснащению выпускаемых орудий разработанными нами рабочими органами.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Котельников В.Я. Культиватор для влажных почв [Текст] / В.Я. Котельников, А.В. Котельников [и др.] // Сельский механизатор. – 2007. – №7. – С. 13–14.
2. Котельников В.Я. История развития почвообрабатывающих машин на этапе средневековья [Текст] / В.Я. Котельников, А.В. Котельников [и др.] // Известия Курского гос. техн. ун-та. – 2007. – № 2(19). – С. 20–24.
3. Котельников В.Я. Исторические аспекты и мониторинг зарубежной сельскохозяйственной техники [Текст] / В.Я. Котельников, А.В. Котельников [и др.] // Известия Курского гос. техн. ун-та. – 2007. – № 3(20). – С. 19–21,
4. Котельников В.Я. Безгербицидная технология спорит с гербицидами [Текст] / В.Я. Котельников, А.В. Котельников [и др.] // Сельский механизатор. – №5. – 2008. – С. 18–23.
5. Котельников В.Я. Мониторинг и оценка технико-экономических показателей сепарирующих рабочих органов [Текст] / В.Я. Котельников, А.В. Котельников [и др.] // Вестник ОрелГАУ. – № 6(27) . – 2010. – С. 134–136.
6. Котельников В.Я. Мониторинг и оценка динамических параметров комбинированных машин по устойчивости глубины хода [Текст] / В.Я. Котельников, А.В. Котельников [и др.] // Известия Курского гос. техн. ун-та. – №2(23). – 2008. – С. 23–28.

Статьи в других изданиях

7. Серебровский В.В. Влияние износа рабочих органов на технологические параметры культиватора [Текст] / В.В. Серебровский, А.В. Котельников [и др.] // Современные наукоёмкие технологии. Технические науки. – М.: Изд. РАЕ. – № 11. – 2012. – С. 12-14.

8. Серебровский В.В. Основные направления и тенденции развития рам и комбинированных машин в России и за рубежом [Текст] / В.В. Серебровский, А.В. Котельников [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. Технические науки. - № 12. – С. 27-31.

Монографии

9. Анутов Р.М. Динамика и расчет комбинированных машин [Текст] / Р.М. Анутов, А.В. Котельников. – Курск, 2013. –128 с.

10. Котельников А.В. Механико-технологические основы многофункциональных экологически безопасных комбинированных машин [Текст] / А.В. Котельников. – Курск, 2013. –199 с.

Патенты

11. Пат. 2475007 РФ, МКИ А01В 17/00, А01В 03/00. Энергосберегающая почвообрабатывающая стойка / А.В. Котельников [и др.] (РФ). – № 2011146778/13; заявлено 17.11.2011; опубл. 20.04.2013. Бюл. № 11. – С. 12-14.

12. Пат. 2474100 РФ, МКИ А01В 17/00, А01В 03/00. Способ выращивания сельскохозяйственных культур по экологически чистой энергосберегающей технологии / А.В. Котельников [и др.] (РФ). – № 2011146778/13; заявлено 17.11.2011; опубл. 20.04.2013. Бюл. № 11. – 4 с.

13. Пат. 2518256 РФ, МПК⁶ А 01 В 29/06. Энергосберегающий плуг / А.В. Котельников [и др.] (РФ). – № 2013105846/13; заявлено 12.02.2013; опубл. 10.06.2014. Бюл. № 16. – 4 с.

14. Пат. 2518730 РФ МПК⁶ А 01.В 29/ 06, А 01 В 49/02. Культиватор с сепарирующими решётками / А.В. Котельников [и др.] (РФ). – № 2012145651/13; заявлено 25.10.2013; опубл. 10.06.2014. Бюл. № 16. – 4 с.

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, учёному секретарю. Телефон (473) 253-75-35, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Котельников Антон Владимирович

РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ
ШТАНГОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 26.11. 2014 г. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Печ.л.1,0.Тираж 120 экз. Заказ №17/2014
Отпечатано отделом оперативной полиграфии ФГБОУ ВПО «Юго-
Западный государственный университет»
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.