

На правах рукописи



Хахулин Александр Николаевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВСПАШКИ
ПУТЕМ УВЕЛИЧЕНИЯ УГЛА ОБОРОТА
ПОЧВЕННЫХ ПЛАСТОВ**

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

Воронеж – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Воронежский ГАУ)»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Василенко Владимир Васильевич

Официальные оппоненты: **Бартенев Иван Михайлович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет имени Г.Ф.
Морозова», профессор кафедры механизации
лесного хозяйства и проектирования машин
 Рыжков Андрей Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ
ВО «Белгородский государственный аграр-
ный университет имени В.Я. Горина», доцент
кафедры машин и оборудования в агробизне-
се

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Курская государственная сель-
скохозяйственная академия имени И.И. Ива-
нова»

Защита состоится 25 мая 2017 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.010.04, созданного на базе Воронежского ГАУ, по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского ГАУ и на сайте www.vsau.ru («Информация о деятельности диссертационных советов» – «Защиты» – «Д 220.010.04»), а также по ссылке: <http://ds.vsau.ru/?p=4545>.

Автореферат разослан 24 марта 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В технологическом процессе основной обработки почвы современными плугами для отвальной вспашки пласты почвы совершают неполный переворот, укладываясь частично на угловую часть предыдущего пласта. Такая укладка объясняется геометрическими характеристиками сечения пласта, существующим способом переворота и ему присущей траекторией опрокидывания. В результате получается неполный переворот корнеобитаемого пахотного горизонта, недостаточно глубокая заделка семян сорных растений, способствующая их всхожести, а также гребнистая поверхность пашни, требующая нескольких дополнительных поверхностных обработок. Диссертационная работа основана на научных положениях развития почвообрабатывающей техники и технологического процесса отвальной вспашки, разработанных в трудах В.П. Горячкина, В.А. Желиговского, М.Н. Летошнев, Н.В. Щучкина, А.Н. Гудкова, Л.В. Гячева, И.М. Панова, Г.Н. Синеокова, Г.Е. Листопада и других ученых и содержит разработку процесса более полного переворота почвенных пластов при вспашке и конструкции дополнительного рабочего органа. И хотя в технологии основной обработки почвы появились тенденции перехода к минимальной и безотвальной обработкам, в научной литературе и в практике мирового сельхозмашиностроения существует уверенность в перспективности отвальной вспашки примерно на половине обрабатываемых площадей. Исходя из того, что тема работы предполагает улучшение качества вспашки, она является актуальной.

Степень разработанности темы. Все значительные теоретические исследования по совершенствованию процесса вспашки базируются на основополагающих работах академика В.П. Горячкина, его учеников и последователей. Классическая методика построения лемешно-отвальной поверхности, разработанная профессором Н.В. Щучкиным, обобщение теоретического наследия по сельскохозяйственным машинам, реализованное профессором М.Н. Летошневым в лучшем в мире учебнике, первые скоростные плуги и их рабочие органы, обоснованные «крылатым пахарем» (газета «Правда», 1960 г.) академиком В.А. Желиговским, первые фронтальные плуги, разработанные авторским коллективом во главе с профессорами В.А. Сакуном и Я.П. Лобачевским, комбинированные плужные корпуса с дополнительными левосторонними лемехами, заменяющими полевые доски, предложенные профессором В.М. Бойковым, комбинированные рабочие органы для вспашки с рыхлением подпахотного горизонта профессора И.Б. Борисенко, упрощенные методы вибрации рабочих органов плуга, предложенные профессором В.В. Василенко – это далеко не полный перечень достижений в теории и практике плугостроения в нашей стране. Однако одно из главных требований агротехники к плугу – заделка семян сорняков на недоступную для прорастания глубину путем полного

оборота пахотного горизонта – до сих пор остается не реализованным каким-либо простым и надежным методом, позволяющим применять его в изменяющихся условиях по глубине обработки и с различными типами плугов. Существуют способы увеличения угла оборота пласта за счет более широкого захвата рабочих корпусов, применения предплужников или углоснимов, изменения формы отвала и т.д., но они приводят лишь к частичному перевороту, оставляя резерв для дальнейших исследований по затронутой теме. На этой основе нами намечены цель и задачи исследования.

Цель работы – улучшение качества вспашки путем увеличения угла оборота почвенных пластов.

Задачи исследования:

- доказать возможность увеличения угла оборота почвенных пластов плужным корпусом с предварительным расширением борозды и преимуществ этого технологического приема;
- определить рациональные конструктивные параметры лемешно-отвального корпуса с дополнительными вертикальными щитками;
- определить силы, действующие на дополнительный щиток в установившемся и неуставившемся режимах работы с изменением факторов скорости движения и глубины обработки;
- определить влияние дополнительных щитков на качественные показатели отвальной вспашки и силу сопротивления плуга.

Объектом исследования принят процесс вспашки почвы лемешно-отвальным плугом.

Предметом исследования является определение закономерностей укладки пластов с предварительным расширением борозды дополнительными рабочими органами.

Научная новизна исследования:

- доказано преимущество предлагаемого процесса оборота почвенных пластов, отличающегося от существующих увеличенным углом оборота за счет постановки дополнительных щитков, расширяющих дно борозды;
- определены рациональные конструктивные параметры дополнительных щитков, расширяющих борозду;
- предложен аналитический расчет сил, действующих на дополнительный щиток, отличающийся определением результирующей силы его сопротивления на основании силы нормального давления;
- результаты экспериментальных исследований плуга с дополнительными щитками, отличающиеся рассмотрением работы в установившемся и неуставившемся режимах с факторами: скорость движения и глубина вспашки.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в разработке положений аналитического рас-

чета сил, действующих на щиток, позволяющих определить рациональные параметры дополнительных щитков, минимальное расстояние между корпусами и дополняющих теорию сельскохозяйственных машин. Практическая значимость состоит в разработке конструкции приспособления, улучшающего качество вспашки и гарантирующего экономию эксплуатационных затрат при основной обработке почвы.

Методы исследования:

В работе использован механико-математический аппарат исследования траектории перемещения почвенных пластов при отвальной вспашке и сил, действующих на рабочие органы, разработанный основоположниками теории взаимодействия почвообрабатывающих орудий и обрабатываемой среды; метод тензометрического определения действующих сил; существующие способы определения качественных показателей при отвальной обработке почвы; оригинальный метод измерения угла переворота пластов; существующая методика определения экономической эффективности экспериментального почвообрабатывающего орудия.

Научные положения, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование преимущества предлагаемого технологического приема для увеличения угла оборота почвенного пласта при отвальной вспашке путем предварительного расширения борозды;
- аналитический расчет сил, действующих на щиток, позволяющий обосновать рациональные параметры дополнительных щитков, расширяющих борозды;
- результаты экспериментальных исследований, подтверждающие достоверность аналитического расчета сил, действующих на щиток;
- конструкция плуга с дополнительными щитками, расширяющими борозды и позволяющими увеличить угол оборота пластов и повысить качество вспашки.

Реализация результатов исследования

Разработана техническая документация на заводское изготовление навесного четырехкорпусного плуга с приспособлением для увеличенного угла оборота почвенных пластов и передана машиностроительному предприятию ООО «Воронежский станкозавод – Холдинг» (г. Воронеж) для промышленного освоения и производства новой техники.

Степень достоверности и апробация результатов. Степень достоверности результатов исследования достигается применением современных методов теории, оборудования для проведения экспериментов, приборов для точного измерения параметров, полученным экспериментальным материалом, достаточной сходимостью экспериментальных и теоретических данных, положительными результатами опытно-производственной проверки промышленного образца плуга с приспособлением для увеличенного угла оборота почвенных пластов.

Материалы диссертационной работы были доложены на ежегодных научных конференциях Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I в 2014-2016 гг., на международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов в Воронежском ГАУ в 2014 г., на международной научно-практической конференции «Экологоресурсосберегающие технологии и системы в лесном и сельском хозяйстве» в Воронежском государственном лесотехническом университете имени Г.Ф. Морозова в 2014 г., на конкурсном отборе технических проектов по программе «УМНИК» в 2015 г.

Результаты диссертационного исследования используются в ООО «ВСЗ-Холдинг» (г. Воронеж) при разработке новых плугов, в учебном процессе ФГБОУ ВО Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ общим объемом 4,87 усл. печ. л. (доля автора – 2,39 усл. печ. л.), включая один патент на изобретение и один патент на полезную модель. В рекомендованных ВАК научных изданиях опубликовано три статьи. Единично автором опубликованы три статьи.

Структура и объем работы. Диссертация включает пять разделов, заключение, список литературы и приложения. Объем работы составляет 173 страницы, из которых 156 страниц основного текста и 17 страниц приложений. В работе имеется 78 иллюстраций, 25 таблиц и список литературы из 125 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается 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 «Состояние вопроса. Цель и задачи исследования» рассмотрены технические средства и способы основной обработки почвы, выявлены тенденции их развития. Сопоставлены по преимуществам и недостаткам доминирующие технологии основной обработки и обозначен приемлемый компромисс по вопросу о предпочтительности их применения. Рассмотрены основные направления совершенствования плугов для отвальной вспашки и приведены литературные данные о преимуществах полного переворота пласта. Приведены существующие способы увеличения угла переворота пласта. На основании анализа литературных источников определена степень разработанности темы, намечены цель и задачи исследования.

Во втором разделе «Обоснование способов оборота пласта и устройства рабочих органов» проведен теоретический анализ технологической эффективности способов увеличения угла оборота почвенных пластов, вычислены предельные значения углов оборота и высоты гребней.

Угол оборота пластов влияет на степень подавления сорной растительности. Введен новый термин – коэффициент μ выживания сорняков при вспашке. Это отношение площади поля с благоприятной глубиной заделки семян сорняков (<12 см) ко всей площади поля. Его можно вычислить как отношение отрезка FC к CD (рисунок 1) на опрокинутой поверхности пласта.

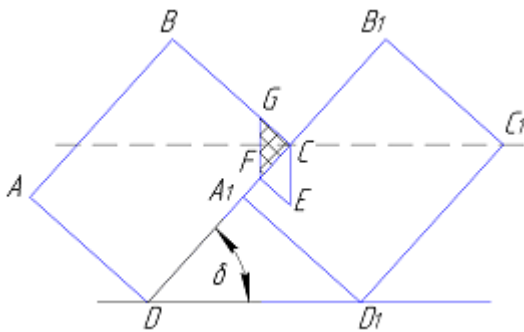


Рисунок 1 – Благоприятная зона для всхожести сорняков

Из треугольника FGC следует $CF = FG \cdot \sin \delta$, а $CD = b$, поэтому

$$\mu = \frac{l_{\min} \cdot \sin \delta}{b} = \frac{l_{\min} \cdot a}{b^2}, \quad (1)$$

где $l_{\min}$ – минимально необходимая глубина заделки семян сорняков для их подавления (отрезок FG);

a – глубина вспашки;

b – ширина захвата рабочего корпуса.

Расчеты показывают, что при ширине захвата рабочего корпуса $b = 35$ см после вспашки сорняки взойдут на 25% площади поля, а при ширине корпуса $b = 45$ см засоренной окажется 15% площади. Дальнейшее увеличение ширины захвата рабочего корпуса увеличивает подавление сорняков незначительно.

При работе с предплужниками угол наклона пластов $\delta_1 < \delta$. Вся зона недостаточно глубокой заделки семян срезана предплужником и сброшена на дно борозды, что значительно влияет на коэффициент выживания сорняков. Однако в реально протекающем процессе переворота пластов подрезанная предплужником часть распадается и перемешивается на отвале с остальной частью пласта, и не все сорные семена оказываются заделанными глубоко. Что касается гребнистости поля, то она все равно не укладывается в агротребования, так как даже при самых благоприятных условиях, когда $a = 0,24$ м, $b = 0,35$ м при глубине хода предплужника 0,10 м получаем гребни высотой $h = 0,13$ м вместо требуемых по агротехнике $h < 0,07$ м. Вариацией этих настроечных параметров процесса вспашки можно только улучшить качество работы плуга, но удовлетворить агротребования невозможно. Для существенного увеличения угла оборота пласта, близкого к 180° , необходимо расширить борозду, то есть сдвинуть заштрихованную часть пласта в пустое пространство ABA_1 , чтобы пласт 3 опрокинулся полностью (рисунок 2).

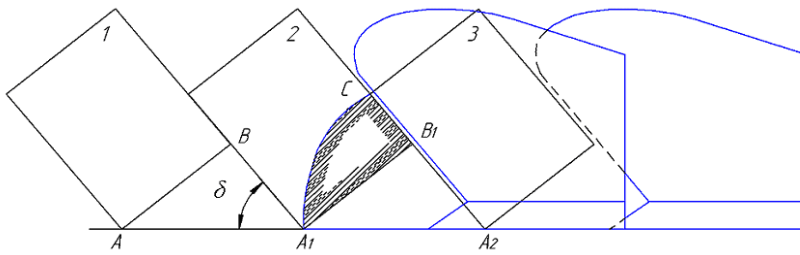


Рисунок 2 – Схема к расчету объема почвы, сдвигаемой щитком

Достаточность пустого пространства определяется коэффициентом заполнения λ , он не превышает 0,5 при $a=0,26$ м и $b=0,35$ м.

$$\lambda = \frac{b^2 \cdot \arcsin \frac{a}{b} - a \sqrt{b^2 - a^2}}{a \sqrt{b^2 - a^2}} \quad (2)$$

Устройство рабочих органов представлено на рисунке 3. На главной балке 1 плуга размещены лемешноотвальные корпуса, каждый из которых имеет лемех 2, отвал 3 и полевую доску 4. К дополнительной балке 5 за каждым корпусом плуга прикреплены стойки 6 и регулируемые по длине упорные штанги 7. На каждой стойке шарнирно закреплен щиток 8 с возможностью поворота вокруг нее. Угол атаки γ у щитка меньше, чем соответствующий угол γ_1 у отвала.

При движении плуга в борозде передний корпус формирует пласт 10, следующий корпус формирует пласт 11. Часть b пласта 10 мешает пласту 11 перевернуться на 180° и лечь на дно борозды. Щиток 8 отодвигает ее под действием своего угла атаки, освобождая место для пласта 11.

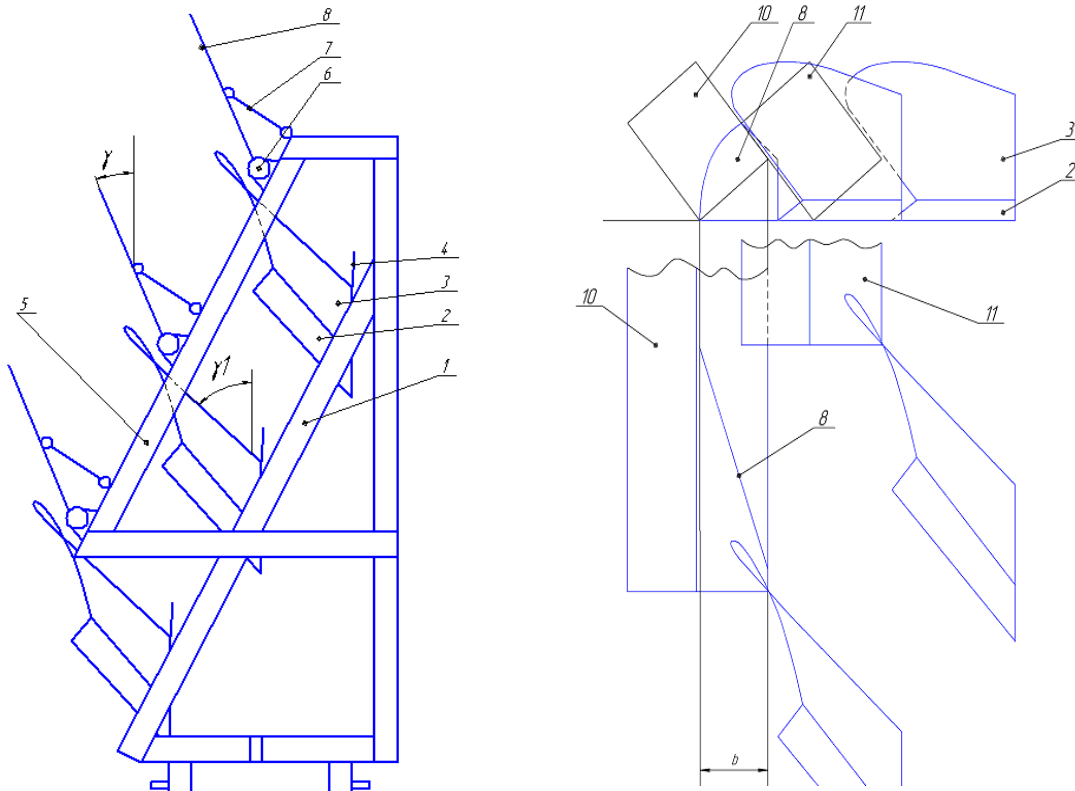
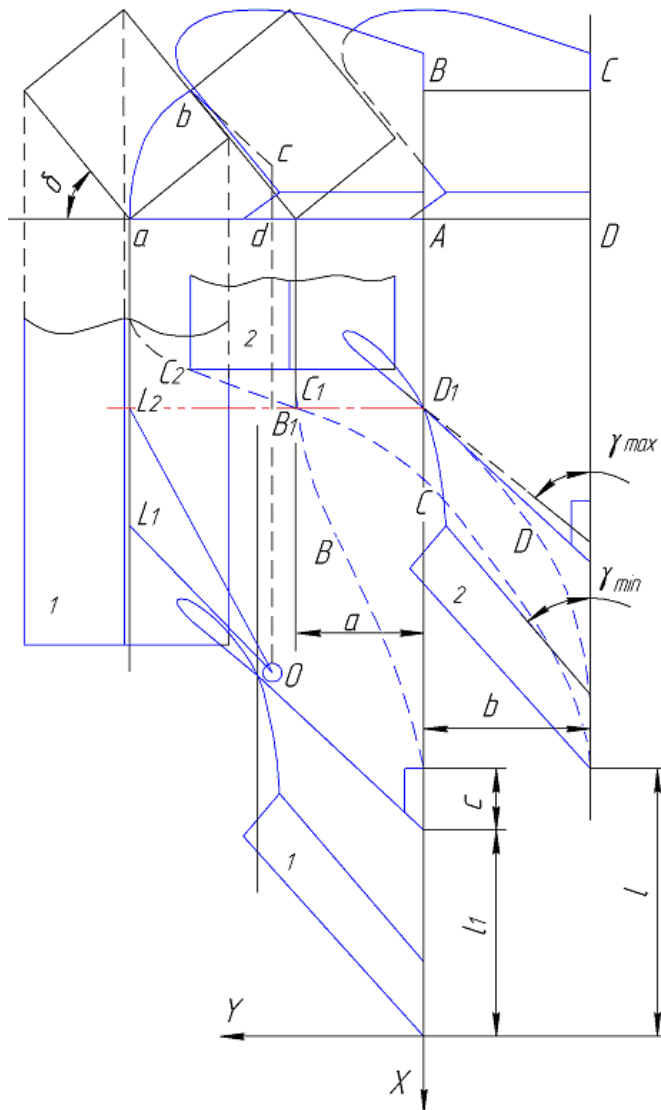


Рисунок 3 – Схема расположения щитков на раме плуга

Для обоснования размеров щитка проведено графоаналитическое исследование минимально возможной дистанции между рабочими корпусами в продольном направлении. По методу проф. Н.В. Щучкина вычерчивалась лемешно-отвальная поверхность в трех проекциях и траектории угловых точек переворачиваемого пласта. Траектории угловых точек переносились на горизонтальную проекцию фрагмента плуга с двумя рабочими корпусами, которые были приближены на минимальную дистанцию, при которой впереди стоящий корпус не касался траектории крайней точки оборачиваемого пласта (рисунок 4).



Ось поворота щитка (точка О) расположена в пределах ширины захвата лемеха, чтобы не опираться на непаханое поле. Конец щитка L_1 или L_2 отстоит от стенки борозды на расстоянии $(a+b)$. Минимальная длина щита OL_1 ограничивается касанием отвала сзади, а максимальная OL_2 — линией L_2D_1 , на которой последующий пласт стоит вертикально и не начал падать на щит. Эти длины вычисляются по выражениям

$$l_{щ\min} = \sqrt{\frac{(a+0,03)^2}{(\operatorname{tg}\gamma_{cp})^2} + (a+0,03)^2}, \quad (3)$$

$$l_{щ\max} = \sqrt{\left(h+c+\frac{0,03}{\operatorname{tg}\gamma_{cp}}\right)^2 + (a+0,03)^2}, \quad (4)$$

где γ_{cp} — угол наклона средней образующей по высоте отвала;

c — выступание стойки корпуса за границу полевого обреза.

Рисунок 4 – К определению длины щитка

Исходя из траектории оборота пластов, минимальное расстояние l между корпусами может быть сокращено до длины горизонтальной проекции полевого обреза плюс выступание стойки корпуса назад за полевой обрез. Для корпусов захватом 0,35 м она может быть сокращена с традиционных 0,79 м до 0,58 м. Рациональная конструктивная длина щитка со-

ставляет 0,58 ... 0,62 м и угол его постановки к направлению движения 23 ... 25°.

Отодвигая часть пласта в сторону, щиток преодолевает несколько составляющих силы, действующей по нормали к его поверхности: усилие среза (в случае связного пласта) N_1 , силу трения при перемещении части пласта по дну борозды N_2 , и силу инерции покоя перемещаемой почвы N_3 .

$$N_1 = 0,5ab\tau_v, \quad N_2 = 0,5abl\psi f', \quad N_3 = M \cdot j, \quad (5)$$

где τ_v – временное напряжение почвы на срез;

l – рабочая длина щита;

ψ – сила веса 1 м³ почвы;

f' – коэффициент внутреннего трения почвы;

M – масса сдвигаемой части пласта;

j – ускорение сдвига.

После преобразований равенств (5) сила нормального давления на щиток принимает вид

$$N = N_1 + N_2 + N_3 = 0,5ab(\rho v^2 \sin \gamma \cos \gamma + \tau_v + l\psi f'), \quad (6)$$

где ρ – плотность почвы;

v – скорость движения агрегата;

γ – угол постановки щитка к направлению движения.

По схеме сил, действующих на щиток OL (рисунок 5), определены сила F трения почвы о щиток, векторная сумма сил $R_{поч}$ трения и нормального давления, тяговое сопротивление P щитка и боковая сила $R_{рамы}$, передаваемая на раму орудия.

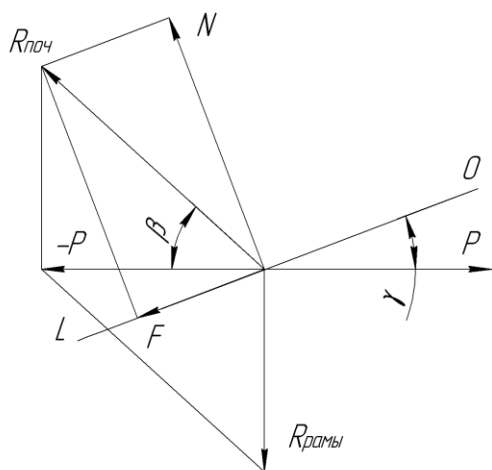


Рисунок 5 – Схема сил, действующих на щиток

$$F = 0,5abf(\rho v^2 \sin \gamma \cos \gamma + \tau_v + l\psi f'), \quad (7)$$

$$R_{поч} = 0,5ab(\rho v^2 \sin \gamma \cos \gamma + \tau_v + l\psi f') \sqrt{1 + f^2}, \quad (8)$$

$$P = R_{поч} \cdot \cos \beta = 0,5ab(\rho v^2 \sin \gamma \cos \gamma + \tau_v + l\psi f') \sqrt{1 + f^2} \cdot \cos(\arctg \frac{1}{f} - \gamma), \quad (9)$$

$$R_{рамы} = P \cdot \tg \beta. \quad (10)$$

Если почва несвязная, крошится на отвале, то сила N_1 отсутствует, уравнения (7), (8), (9), (10) упрощаются. Графически они выглядят в виде линейной восходящей зависимости от глубины вспашки.

На рисунке 4 показан неустановившийся режим работы при первом проходе плуга, когда пласт, поднятый передним корпусом, не может перевернуться или переворачивается неполностью. В дальнейшем плуг работает при установившемся режиме, когда пласты перевернуты, но разрыхлен-

ные, с углом естественного откоса φ' , и щитку $A_{щ}$ остается лишь подгрести осыпавшуюся почву (рисунок 6). Тогда сила трения по дну борозды

$$N_2 = Sl\psi f', \quad (11)$$

сила инерции покоя

$$N_3 = \frac{0,125a^2\rho v^2 \sin\gamma \cos\gamma}{f'}, \quad (12)$$

и сила подъема почвы из треугольника A_1KM в треугольник KNB_1

$$N_4 = 0,165a^2l\psi. \quad (13)$$

Нормальная сила на щитке при установившемся режиме работы в условиях разрыхленных почвенных пластов

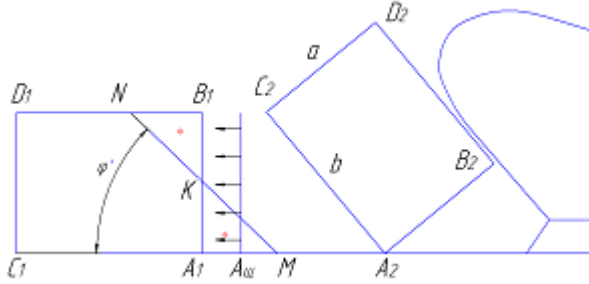


Рисунок 6 – Действие щитка в установившемся режиме работы

$$N = N_2 + N_3 + N_4 = 0,125a^2l\psi + \frac{0,125a^2\rho v^2 \sin\gamma \cos\gamma}{f'} + 0,165a^2l\psi. \quad (14)$$

После упрощения $N = 0,125a^2 \left(2,32l\psi + \frac{\rho v^2 \sin\gamma \cos\gamma}{f'} \right).$ (15)

Остальные силы: $F = 0,125a^2 f \left(2,32l\psi + \frac{\rho v^2 \sin\gamma \cos\gamma}{f'} \right),$ (16)

$$R_{поч} = 0,125a^2 \left(2,32l\psi + \frac{\rho v^2 \sin\gamma \cos\gamma}{f'} \right) \sqrt{1 + f^2}, \quad (17)$$

$$P = 0,125a^2 \left(2,32l\psi + \frac{\rho v^2 \sin\gamma \cos\gamma}{f'} \right) \sqrt{1 + f^2} \cdot \cos \left(\arctg \frac{1}{f} - \gamma \right). \quad (18)$$

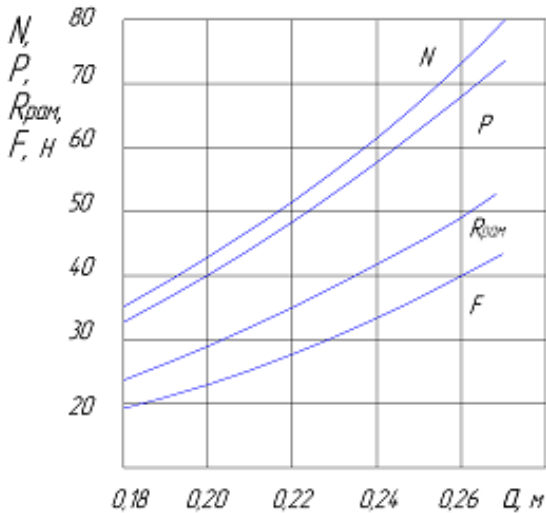
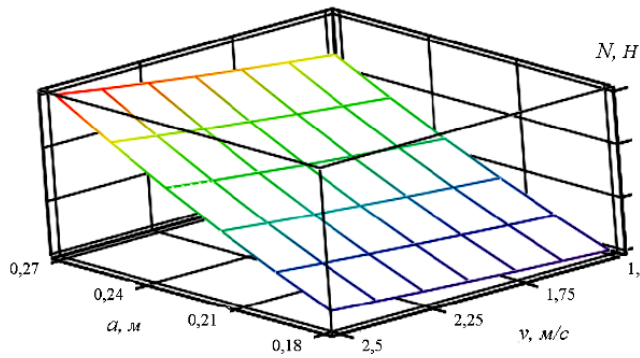


Рисунок 7 – Влияние глубины a на действующие силы в установившемся режиме с нормальным крошением почвы при $v=1,5$ м/с

Все эти силы имеют параболическую зависимость от глубины вспашки (рисунок 7). Выражение (2.15) для нормальной силы показывает на графике (рисунок 8) параболическую зависимость и от скорости движения, но с меньшим влиянием, чем влияние глубины обработки.

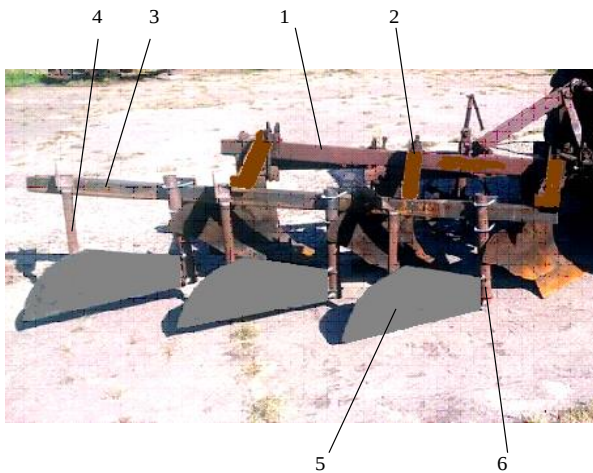
Теоретические расчеты показали, что сила тягового сопротивления плуга на один рабочий корпус при постановке щитков увеличивается на 0,5 ... 0,6 кН при связных пластах и на 0,2 кН при нормальных почвенных условиях с крошением



на отвалах. Это увеличение силы сопротивления снижается в два-три раза при установившемся режиме вспашки и составляет 74 Н на один щиток при скорости движения 1,5 м/с и глубине вспашки 0,27 м.

Рисунок 8 – Влияние глубины a и скорости v на нормальную силу в установившемся режиме с нормальным крошением почвы

В третьем разделе «Программа и методика экспериментальных исследований» представлены программа лабораторно-полевых исследований макетного и промышленного образцов плуга, описано их устройство (рисунки 9 и 10) и техническая характеристика, перечислены применяемые средства измерений и оборудование, дана методика определения показателей качества вспашки и силовых параметров работы приспособления для полного оборота пластов, порядок обработки экспериментальных данных и критерии оценки сходимости результатов опытов с теоретическими расчетами. Применялась методика по стандарту СТО АИСТ 4.1 – 2010 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и орудия для глубокой обработки почвы. Методы оценки функциональных показателей».



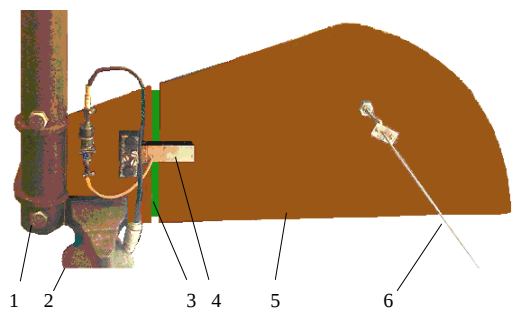
1 – плуг ПН-3-35; 2 – кронштейн дополнительной балки; 3 – дополнительная балка; 4 – задняя опора щита; 5 – щит; 6 – ось поворота щита

Рисунок 9 – Макетный образец плуга



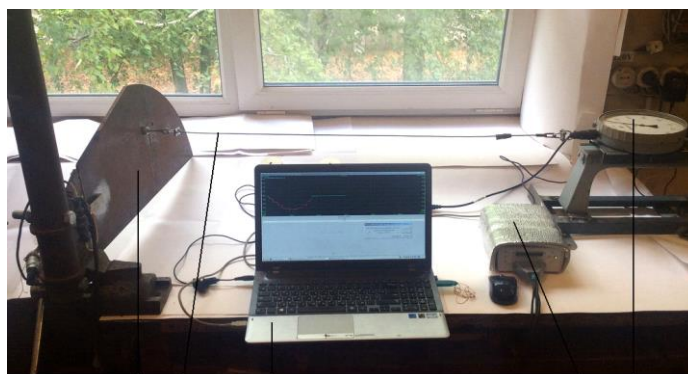
Рисунок 10 – Промышленный образец плуга

Влияние приспособления на измеряемые параметры вспашки определялись на одних и тех же образцах плуга с установленным или демонтированным приспособлением для полного оборота пластов.



1 – стойка; 2 – тиски; 3 – ось поворота; 4 – тензобалка; 5 – щиток; 6 – нагрузочный трос от динамометра

Рисунок 11 – Щиток на тарировочной установке



1 – щиток; 2 – нагрузочный трос; 3 – компьютер; 4 – аналого-цифровой преобразователь; 5 – динамометр с винтовым механизмом перемещения (нагружения)

Рисунок 12 – Тарировочная установка

В четвертом разделе «Результаты экспериментальных исследований» отражены результаты опытов на полях учебно-научного центра ВГАУ «Агротехнология» на двух фонах (черный пар и стерня амаранта) (рисунок 13).



Рисунок 13 – Вспашка макетным образцом черного пара

При вспашке черного пара достигнут угол оборота пластов $165 \dots 172^\circ$ по сравнению с $125 \dots 130^\circ$ в контрольном варианте. Гребнистость поверхности уменьшилась с 15,9 до 4,6%, глыбистость – с 35,8 до 13,2%, крошение почвы улучшилось с 64,2 до 86,8%.

При вспашке по стерневому фону показатели опытного образца плуга оказались тоже лучше кон-

трольного: угол оборота пластов $160 \dots 180^\circ$ против $120 \dots 140^\circ$, гребнистость уменьшилась с 17,0 до 5,3%, глыбистость – с 46,2 до 17,3%, крошение почвы улучшилось с 53,8 до 82,7%. Заделка в почву стерни и растительных остатков улучшилась весьма значительно – с 56 до 98%. В опытах отмечено, что глубина вспашки незначительно уменьшает угол оборота пластов, а скорость агрегата – увеличивает.

Проведены измерения нормальной силы давления почвы на щиток при неустановившемся и установившемся режимах работы при изменении глубины вспашки и скорости движения.

Поскольку уравнение (15) можно представить в виде $N = b_1 a^2 + b_2 a^2 v^2$, то такого же типа было принято эмпирическое уравнение, коэффициенты

b_1 и b_2 которого были определены методом наименьших квадратов по девяти опытам. Опыты планировались по полному факторному эксперименту типа 3^2 . Оба фактора (глубина вспашки и скорость движения) варьировали на трех уровнях. Получено эмпирическое уравнение

$$N = 920,43 a^2 + 69,47 a^2 v^2, \quad (19)$$

которое неплохо согласуется с результатами измерения нормальной силы, действующей на щиток (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты измерения и расчета по эмпирической формуле нормальной силы, действующей на щиток в установившемся режиме работы плуга

Номер опыта	$a, м$	$v, м/с$	$N, Н$	
			по измерению	по формуле
1	2	3	4	5
1	0,18	1,48	34,7	34,8
2	0,18	1,90	38,9	37,9
3	0,18	2,25	42,2	41,2
4	0,22	1,48	52,3	51,9
5	0,22	1,90	57,4	56,6
6	0,22	2,25	61,5	61,6
7	0,27	1,48	77,6	78,2
8	0,27	1,90	85,2	85,4
9	0,27	2,25	92,0	92,8

Поверхность отклика по выражение (19) представлена на рисунке 14.

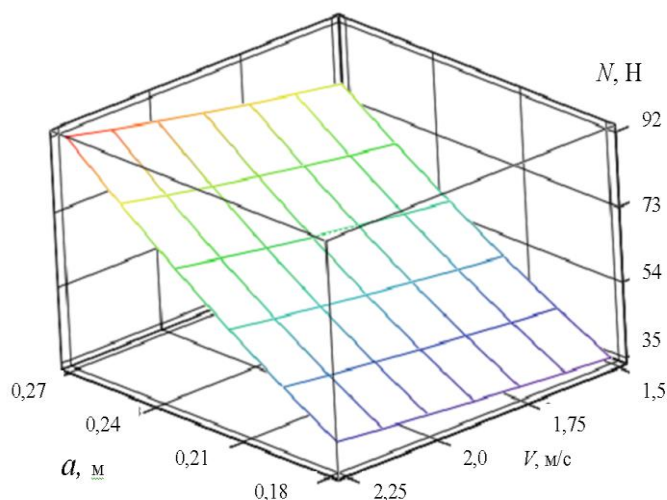


Рисунок 14 – Поверхность отклика эмпирической зависимости силы давления почвы на щиток от глубины вспашки и скорости движения при установившемся режиме работы плуга

Для оценки соответствия экспериментальных данных с теоретическими доводами по критериям согласия сопоставим с ними одно из сечений поверхности отклика при постоянной скорости ($v=2,0$ м/с). Теоретическое выражение (15) при $v=2,0$ м/с принимает вид

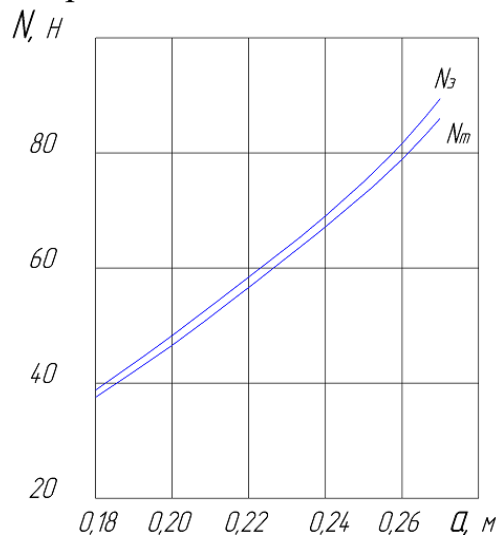
$$N_m = 1178,6 \cdot a^2, \quad (20)$$

где a – глубина вспашки, м.

Сечение поверхности отклика по $v=2,0$ м/с представляет собой равенство

$$N_z = 1198,31 \cdot a^2. \quad (21)$$

Графическое представление этих выражений (рисунок 15) показывает, что разница между теоретическими и опытными данными в зоне наиболее применимых на практике значений переменных параметров пренебрежимо мала.



Проверка соответствия данных по критерию согласия Пирсона χ^2 показала, что с вероятностью $p=0,99$ опытные данные не противоречат теоретической зависимости.

По А.Н. Колмогорову, вероятность того, что опытные данные не противоречат теоретическому выражению, равна единице.

Рисунок 15 – Экспериментальная и теоретическая зависимости нормальной силы от глубины вспашки (v 2 м/с)

На основании известной силы нормального давления на щиток получены выражения для определения дополнительного тягового сопротивления ΔP и дополнительных затрат мощности $\Delta N_{\text{мощ}}$ при оборудовании четырехкорпусного плуга приспособлением для более полного оборота пластов:

$$\Delta P = 0,5a^2 \left(2,32l\psi + \frac{\rho v^2 \sin\gamma \cos\gamma}{f'} \right) \sqrt{1+f^2} \cdot \cos \left(\arctg \frac{1}{f} - \gamma \right), \quad (22)$$

$$\Delta N_{\text{мощ}} = 0,5a^2 v \left(2,32l\psi + \frac{\rho v^2 \sin\gamma \cos\gamma}{f'} \right) \sqrt{1+f^2} \cdot \cos \left(\arctg \frac{1}{f} - \gamma \right). \quad (23)$$

В нормальных почвенных условиях работы с пластами, крошащимися на отвале, сила нормального давления почвы на щиток у плуга с шириной захвата рабочего корпуса 0,35 м варьирует от 130 до 250 Н при неустановившемся режиме и от 35 до 86 Н при установившемся режиме. Эти показатели получены при регулировании глубины вспашки от 0,18 до 0,27 м и скорости движения от 1,48 до 2,25 м/с.

Приращение тягового сопротивления четырехкорпусного плуга с шириной захвата рабочего корпуса 0,35 м при постановке щитков для расширения борозды составляет 130 ... 330 Н с теми же вариациями глубины вспашки и скорости движения, а приращение затрат мощности составляет 190 ... 750 Вт.

Опытно-производственная проверка работы промышленного образца плуга с приспособлением для увеличенного угла оборота пластов проводилась в агрегате с трактором Беларусь МТЗ-1221.2 с измерением показателей качества вспашки, буксования колес, расхода топлива. Полученные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Агротехническая оценка вспашки промышленным образцом плуга

Наименование показателей	Плуг с приспособлением	Серийный плуг
Скорость движения агрегата, м/с	1,72	1,72
Средняя глубина обработки почвы, см	25,1	25,2
Среднее квадратичное отклонение, см	0,8	0,8
Коэффициент вариации, %	3,2	3,2
Коэффициент буксования колес трактора, %	8,5	8,3
Удельный расход топлива, кг/ч чистой работы	14,8	14,4
Гребнистость поверхности: - проценты - балльная оценка по СТО АИСТ 4.1 – 2010	4,8 «отлично»	16,3 «плохо»
Глыбистость поверхности: - процент площади глыб более 5 см - балльная оценка по СТО АИСТ 4.1 – 2010	13,4 «хорошо»	36,3 «очень плохо»
Крошение почвы: - проценты - балльная оценка по СТО АИСТ 4.1 – 2010	86,6 «хорошо»	63,7 «очень плохо»
Угол оборота пластов, градус	177	130
Среднее квадратичное отклонение, градус	7,6	6,8
Коэффициент вариации, %	4,3	5,2
Средняя ошибка опыта, градус	1,4	1,2
Показатель точности опыта, %	0,79	0,96
Заделка в почву стерни и растительных остатков, %	99	61

Таким образом, испытания промышленного образца плуга показали отличное качество вспашки при дооборудовании плуга приспособлением для увеличения угла оборота пластов. Такое оборудование может быть поставлено на любые модификации плугов, в том числе оборотных с симметричным расположением левосторонних и правосторонних корпусов.

В пятом разделе «Экономическое обоснование целесообразности разработки приспособления к плугам для увеличенного угла оборота пластов» сопоставляются эксплуатационные затраты на проектный и базовый варианты основной обработки почвы. За проектный вариант принят агрегат Беларусь МТЗ-1221.2+ПН-4-35П, то есть четырехкорпусный навесной плуг для вспашки с увеличенным углом оборота пластов. За базовый вариант принято применение двух агрегатов последовательно: Беларусь

МТЗ-1221.2+ПН-4-35 без приспособления для более полного оборота пластов и культивирующего агрегата Беларус МТЗ-1221.2+С-11У+2·КСПС-6Г, так как качество вспашки будет сопоставимым по обработке глубинных и поверхностных горизонтов почвы, а также по подавлению сорняков. Определены показатели экономической эффективности проектного варианта основной обработки почвы (таблица 3).

Таблица 3 – Показатели экономической эффективности четырехкорпусного навесного плуга с приспособлением для увеличенного угла оборота пластов

Показатели	Значение показателей
Срок эксплуатации проекта, год	9
Инвестиционные вложения, тыс. руб.	85,00
в т.ч.: в основные средства, тыс. руб.	85,00
Годовой экономический эффект, тыс. руб.	50,40
Экономический эффект за срок реализации проекта, тыс. руб.	744,69
Цена спроса на комплекс ресурсов для реализации проекта, тыс. руб.	268,54
Коэффициент эффективности вложений	0,27
Срок окупаемости, год	2,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общие выводы

1 Увеличение угла оборота пластов за счет приращения ширины захвата корпуса и применения предплужников имеет свои пределы, не удовлетворяющие агротребования к вспашке по состоянию поверхности поля и заделке растительных остатков и семян сорняков. Теоретически максимальный угол оборота не доходит до 150°, а высота гребней превышает требуемые 7 см и варьирует от 17 до 23 см. Неполный оборот пластов создает условия для всхожести 25% сорняков из осыпавшихся на поверхность поля семян.

2 Применение оборота пласта с предварительным расширением борозды предлагаемым приспособлением к отвальному плугу при вспашке по черному пару и по стерневому фону обеспечило угол оборота пластов 165-180°, гребнистость поверхности 4,6-5,3%, глыбистость 13,2-17,3, заделку растительных остатков 98-99%, что по балльной оценке (методика СТО АИСТ 4.1 – 2010) оценивается на «хорошо» и «отлично». Плуг без приспособления показал угол оборота пластов 125-140°, гребнистость 15,9-17,0%, глыбистость 35,8-46,2%, что оценивается на «плохо» и «очень плохо».

3 Глубина вспашки и скорость движения агрегата влияют на угол оборота пластов так же, как и по теоретическим представлениям для обычной вспашки: по черному пару и по стерне рост глубины вспашки от 16,8 до 25,0 см снижает угол оборота с 178 до 166°, а увеличение скорости движения агрегата с 1,3 до 2,2 м/с увеличивает угол оборота с 160 до 177°.

4 Для плугов с шириной захвата корпусов 0,35 м минимальная длина щитка, отодвигающего пласт, равна 0,45 м, его угол атаки равен среднему углу сдвига лемешно-отвальной поверхности, а расстояние конца щитка от стенки борозды равно сумме глубины a и ширины b пласта. Максимально возможная длина щитка зависит от продольного расстояния между корпусами плуга. У перспективных конструкций плугов без полевых досок и предплужников минимальная дистанция между корпусами в продольном направлении при ширине захвата корпуса 0,35 м теоретически может быть уменьшена с 0,79 до 0,58 м. В этом случае максимально возможная длина щитка равна 0,65 м, его угол атаки равен 22°, расстояние от стенки борозды равно $(a+b)$. Рекомендуемая длина щитка 0,58-0,62 м и угол атаки 23-25°. При другой ширине захвата корпуса указанные размеры изменяются пропорционально.

5 Нормальная сила сопротивления почвы, действующая на щиток, зависит как от настроечных параметров плуга, так и от режима работы – неустановившегося или установившегося. Неустановившийся режим существует только при первом рабочем проходе и исследовался для дальнейших расчетов прочностных характеристик крепления щитков. Установившийся режим существует в течение всей рабочей смены и определяет энергетические затраты на вспашку. В нормальных почвенных условиях работы с пластами, крошащимися на отвале, сила нормального давления почвы на щиток у плуга с шириной захвата рабочего корпуса 0,35 м варьирует от 130 до 250 Н при неустановившемся режиме и от 35 до 86 Н при установившемся режиме. Эти показатели получены при регулировании глубины вспашки от 0,18 до 0,27 м и скорости движения от 1,48 до 2,25 м/с. Приращение тягового сопротивления четырехкорпусного плуга с шириной захвата рабочего корпуса 0,35 м при постановке щитков для расширения борозды составляет 130-330 Н с теми же вариациями глубины вспашки и скорости движения, а приращение затрат мощности составляет 190-750 Вт.

6 Для достижения сопоставимого качества обработки почвы проектным и базовым вариантами последний должен содержать не менее двух полевых операций – для глубокой и поверхностной обработок. При выбранном варианте поверхностной обработки годовая экономия от применения проектного плуга составляет 50,4 тыс. руб., экономический эффект за 9-летний срок реализации проекта составляет 744,7 тыс. руб., и срок окупаемости инвестиционных вложений составляет два года. Внедрение

проектного плуга в сельскохозяйственное производство экономически оправдано.

Рекомендации производству

По результатам научно-исследовательской работы составлена техническая документация на производство четырехкорпусного навесного плуга с приспособлением для увеличенного угла оборота почвенных пластов и передана Воронежскому машиностроительному предприятию ООО «ВСЗ-Холдинг» для расширения номенклатуры выпускаемых почвообрабатывающих орудий.

Возможное направление дальнейших исследований

Дальнейшие исследования по улучшению качества отвальной вспашки путем увеличения угла оборота почвенных пластов могут иметь направление по применению подпружиненного крепления щитков к осям поворота, чтобы автоматически подстраиваться под неустановившийся режим работы. Можно исследовать различные формы щитков – от плоских пассивных до рыхлящих перевернутый пласт и выравнивающих вспаханную поверхность.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1 Василенко В.В. Способы повышения качества отвальной вспашки [Текст] / В.В. Василенко, С.И. Коржов, С.В. Василенко, А.Н. Хахулин // Вестник ВГАУ: Теоретический и научно-практический журнал. – Воронеж: Воронежский гос. аграр. университет. – 2014. – № 3 (42). – С. 118-122.

2 Василенко В.В. Минимальная дистанция между корпусами плуга [Текст] / В.В. Василенко, С.В. Василенко, А.Н. Хахулин // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2014. – № 4. – С. 23-25.

3 Василенко В.В. Плуг с полным оборотом пластов [Текст] / В.В. Василенко, С.В. Василенко, А.Н. Хахулин. – Вестник ВГАУ: Теоретический и научно-практический журнал. – Воронеж: Воронежский гос. аграр. университет. – 2015. – № 4 (47). – С. 122-125.

Патенты

4 Патент на изобретение 2549776 РФ МПК А01В 15/00, А01В 15/10 Плуг с полным переворотом пласта / В.В. Василенко, С.В. Василенко, А.Н. Хахулин (РФ). – № 2013148232/13; заявлено 29.10.2013; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 12. – 4 с.

5 Патент на полезную модель 165480 РФ МПК G01L 5/13. Полевая испытательно-тарировочная установка для почвообрабатывающих рабочих органов / В.В. Василенко, С.В. Василенко, А.Н. Хахулин, В.И. Руденко (РФ). – № 2015148121/13, заявлено 09.11.2015, опубл. 20.10.2016. Бюл. №29.

В сборниках научных трудов и материалах конференций

6 Хахулин А.Н. Влияние ширины захвата рабочих корпусов плуга на подавление сорной растительности [Текст] / А.Н. Хахулин. – Инновационные технологии и технические средства для агропромышленного комплекса: материалы научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов / Коллектив авторов. – Воронеж: ФГБОУ Воронежский ГАУ, 2015. – С. 12-14.

7 Василенко В.В. Затраты мощности на расширение борозды при вспашке [Текст] / В.В. Василенко, С.В. Василенко, А.Н. Хахулин. – Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Сб. науч. тр. по материалам международной научно-практич. конф. «Эколого-ресурсосберегающие технологии и системы в лесном и сельском хозяйстве». – Воронеж: ВГЛТА, 2014. – С. 402-406.

8 Хахулин А.Н. Способ расширения борозды для полного переворота пласта [Текст] / А.Н. Хахулин, В.В. Василенко. – Инновационные технологии и технические средства для АПК: Материалы международной науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, ч.3. – Воронеж: ВГАУ, 2014. – С.130-134.

9 Василенко В.В. Разработка плуга с полным оборотом почвенных пластов / В.В. Василенко, С.В. Василенко, А.Н. Хахулин. – Агропромышленный комплекс на рубеже веков: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию агроинженерного факультета. Воронежский государственный аграрный университет. – Под общей редакцией Н.И. Бухтоярова, В.И. Орбинского. – 2015. С. 240-243.

10 Хахулин А.Н. Разработка плуга с полным оборотом почвенных пластов [Текст] / А.Н. Хахулин. – Сборник докладов. – Воронеж: Воронежский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго РФ, 2015. – С. 49-51.

11 Хахулин А.Н. Полевые испытания модернизированного плуга / А.Н. Хахулин. – Инновационные направления развития технологий и технических средств механизации сельского хозяйства: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию кафедры сельскохозяйственных машин агроинженерного факультета Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I. – Ч. 1. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2015. – С. 88-92.

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