

На правах рукописи



Стеновский Вячеслав Сергеевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖИТЕЛЯ
КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ
НА НЕГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства
механизации сельского хозяйства
Специальность 05.20.03 – Технологии и средства технического
обслуживания в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Оренбург, 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Оренбургский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВПО ОГАУ).

Научные руководители: **Асманкин Евгений Михайлович** – доктор технических наук, профессор (специальность 05.20.01);
Шахов Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор (специальность 05.20.03).

Официальные оппоненты: **Старцев Сергей Викторович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и сельскохозяйственные машины в АПК» ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова»;
Инсафудинов Самат Зайтунович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехники и энергообеспечения предприятий» ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет».

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет»

Защита диссертации состоится 05 декабря 2014 г. в 12.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 220.051.02 при ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный аграрный университет» по адресу: 460014, г. Оренбург, ул. Коваленко, д. 4 (корпус № 3 ОГАУ, инженерный факультет), ауд. 500.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Оренбургского государственного аграрного университета. Объявление о защите и автореферат размещены на сайте ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный аграрный университет» <http://www.ogensau.ru> и на сайте Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки Минобрнауки России <http://www.vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

В.А. Шахов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в сферу сельскохозяйственного производства России внедряются агротехнологии на базе систем глобального позиционирования, предполагающие необходимость обеспечения высокой точности при выполнении операций, которая в первую очередь определяется степенью соответствия траектории движения трактора заданному курсу. Мировой опыт показывает, что эффективность функционирования высокоточных технологий напрямую зависит и от возможности самого тягово-энергетического модуля выдерживать заданный курс, что особенно важно при работе на наклонных участках опорной поверхности, где движение осуществляется в режиме наличия возмущающего его фактора – боковой скатывающей силы. Ряд причин, среди которых одной из главных является несовершенство конструктивных элементов движителей и несоответствие их параметров оптимальным величинам, обуславливают неполное преобразование мощности, развиваемой двигателем, в функциональный недостаток, ограничивающий эксплуатацию МТА в условиях склонового земледелия, где потери на буксование в колесном движителе достигают до 40%. Это приводит к нарушению агротехнических требований и дополнительным материальным затратам, что, в конечном итоге, повышает себестоимость продукции растениеводства. Следовательно, проблема обоснования параметров движителя колесного трактора для эксплуатации на негоризонтальной опорной поверхности требует оперативного решения, а ее актуальность и достоверность реализации основываются на возможности использования потоков мощности, идущих на буксование, в качестве фактора, стабилизирующего движение. Это может категорироваться как рабочая гипотеза, дифференцируемая по двум направлениям: создание новой техники; повышение технологичности существующей путем увеличения степени адаптивности к конкретным условиям эксплуатации за счет уже заложенного в нее конструктивного и режимного потенциала. Реализация последнего требует меньших материально-технических затрат и значительного снижения времени процесса внедрения.

Работа выполнена в рамках программы научных исследований «Разработка высокоэффективных зональных машинных технологий и оборудования нового поколения для производства конкурентоспособной сельскохозяйственной продукции растениеводства».

Цель исследования. Предотвращение увода машины от технологической траектории в условиях склонового земледелия.

Объект исследования. Процесс увода колесного трактора от заданного курса в режиме эксплуатации на наклонных участках опорной поверхности.

Предмет исследования. Закономерности влияния тангенциальной составляющей касательной силы тяги на курсовую устойчивость машинно-тракторного агрегата.

Методика исследований. Теоретические исследования базировались на методах теории устойчивости движения колесных машин, математическом и физическом моделировании ландшафтных характеристик, теории резания почв, основанной на положениях механики грунтов. Экспериментальные исследования проводили в соответствии с действующими стандартами на основе общепринятых и частных методик с использованием теории планирования

многофакторного эксперимента. Обработка экспериментальных данных проводилась методами математической статистики, а также программ Microsoft Excel, MathCAD14, STATISTICA10.

Научная новизна

по специальности 05.20.01:

– методика теоретического обоснования процесса курсовой стабилизации колесного трактора в условиях ландшафтной нестабильности сельскохозяйственных угодий;

– теоретическое обоснование конструктивно-режимных параметров движителя колесного трактора;

– методика оптимизации конструктивно-режимных параметров инновационного технического решения для стабилизации курсовой устойчивости колесной машины;

– методика определения аналитических зависимостей, формализующих процесс преобразования буксования в полезную работу;

по специальности 05.20.03:

– методика расчета интенсивности процесса изнашивания рабочей поверхности протектора при выполнении технологических операций в условиях склонового земледелия;

– математическая модель процесса изнашивания рабочих поверхностей элементов протектора для интерактивной технологической среды эксплуатации мобильных энергетических средств.

Практическая значимость работы

по специальности 05.20.01:

– разработан способ стабилизации курсовой устойчивости колесной машины на наклонной опорной поверхности, реализуемый инновационным техническим решением, подтвержденным патентом на изобретение (RU 2330763 С2);

– предложен вариант инновационного протектора для колесного движителя, посредством которого отклонение от заданной технологической траектории снижается на 22%;

– закономерности преобразования энергии сопротивления качению в полезную работу процесса стабилизации курсовой устойчивости;

по специальности 05.20.03:

– установлены закономерности формализации взаимодействия параметрических моделей при изменении конфигуративно-геометрических характеристик колеса и наклонной опорной поверхности;

– предложен алгоритм расчета интенсивности изнашивания рабочих поверхностей протектора колесного движителя для условий ландшафтной нестабильности.

Вклад автора в проведенное исследование. Разработана аналитическая процедура, получены функциональные зависимости преобразования энергии сопротивления качению в полезную работу процесса стабилизации курсовой устойчивости, проведены лабораторно-производственные эксперименты и дано технико-экономическое обоснование внедрения опытного образца в реальное сельскохозяйственное производство.

Внедрение. Научно-методические материалы по обоснованию способа стабилизации курсовой устойчивости, проектированию и режимно-

параметрическому анализу элементов колесного движителя введены в учебный процесс изучения курса «Теория трактора и автомобиля» Оренбургского ГАУ.

Апробация. Основные положения диссертационной работы представлены на научно-практических конференциях молодых ученых и специалистов (Оренбург, 2005–2013 гг.); международных научно-практических конференциях (Москва, 2007; Оренбург, 2012; Саратов, 2012).

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты теоретических исследований силового баланса в процессе взаимодействия элементов протектора с наклонной опорной поверхностью.

2. Функциональная взаимосвязь мощности, реализуемой на курсовую устойчивость трактора, и конфигуративно-геометрических параметров рабочих элементов протектора колесного движителя.

3. Способ интерактивного анализа изменения геометрических характеристик рабочих элементов протектора движителя колесного трактора при выполнении технологических операций.

4. Результаты производственных исследований процесса отклонения экспериментального трактора от технологической траектории для различных ландшафтных условий при реализации заданных эксплуатационных режимов.

5. Результаты технико-экономического обоснования внедрения предлагаемого технического решения.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается высоким уровнем сходимости теоретически определенной величины отклонения от заданной траектории с результатами экспериментальных исследований при движении колесной машины, оборудованной модернизированными шинами по негоризонтальной опорной поверхности.

Публикации. Результаты исследования опубликованы в 20 научных трудах, в том числе пять публикаций в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Получено 2 патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы, изложена на 132 страницах машинописного текста, включая 35 рисунков, 18 таблиц и библиографического списка из 165 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность темы, сформулирована цель исследований, определены объект и предмет исследования, научная новизна и практическая ценность исследований, положения, выносимые на защиту.

В главе 1 «Анализ проблемы технической реализации процесса стабилизации курсовой устойчивости колесного трактора» проведен анализ работ в области динамики колесных мобильных машин в условиях выполнения технологических операций на негоризонтальных опорных поверхностях, обзор процесса взаимодействия колеса с опорной поверхностью, систем точного земледелия.

Траекториальная стабильность движения и управляемость колесных машин являются одними из наиболее важных факторов, оказывающих влияние на показатели качества выполнения сельскохозяйственных работ колесными тракторами. Исследованиям в области устойчивости, управляемости и теории

взаимодействия эластичного колеса с опорной поверхностью посвящен ряд работ известных ученых. Наиболее существенный вклад внесли: Д.А. Антонов, В.П. Горячкин, А.М. Гуревич, В.В. Гуськов, В.П. Бойков, Л.В. Гячев, В.Ф. Коновалов, А.Б. Лурье, Я.М. Певзнер, А.В. Рославцев, Х.А. Хачатрян, А.А. Хачатуров, Д.А. Чудаков, Е.А. Чудаков. Из зарубежных ученых следует отметить работы Ali O.S., W. Bergman, R.S. Sharp, Richard G., G. Rill, L. Segel, F. Vik, J.Y. Wong. Из работ последних лет, направленных на решение задач, связанных с повышением эффективности использования колесных машин, следует отметить диссертации Ю.А. Судника, А.Ф., Зимагулова, И.В. Ходеса, Р.П. Кушвида, С.В. Глотова, А.П. Савельева, Ю.Д. Погуляева, Ю.А. Коцарь, В.И. Рязанцева.

Существующий парк колесных тракторов один из наиболее объемных в России. В настоящее время экономике РФ требуется порядка 1,6 млн тракторов с ежегодной поставкой до 170 тыс. шт. По данным Минсельхоза РФ, на 2014 год парк колесных тракторов насчитывал около 783 тыс. шт. тракторов. То есть машин, поставляемых в РФ и выпускаемых всеми заводами СНГ, явно недостаточно.

Обследование ландшафтных характеристик пахотных земель Оренбургской области по углу склона в сельскохозяйственных зонах показывает нам, что в области возможно ввести в обработку дополнительно 33,75% сельскохозяйственных площадей (склоны от 3 до 10 градусов) без применения специализированной тракторной техники, предназначенной для работы на склонах.

В результате изучения литературных источников установлено, что современные колесные тракторы являются энергонасыщенными мобильными средствами, преобразование мощности которых в функциональную реализацию не происходит по ряду причин, одной из которых является несовершенство конструктивных элементов движителя и несоответствие их параметров оптимальным величинам.

Применение высокотехнологичного оборудования совместно с цифровыми технологиями обеспечивает достаточную степень прямолинейности движения. Однако при этом не учитываются такие факторы, как взаимодействие движителя с опорной поверхностью, которая в свою очередь может быть не подготовлена для такой работы. При этом величина «рысканья», которое происходит при повороте носа трактора влево или вправо, не будет входить в интервалы точности, указанные в технической характеристике приборов. Крутизна склонов, пересеченная местность, почвенно-климатические условия и другие факторы не позволяют эффективно использовать для обработки склонов серийные, неспециализированные тракторы. Одним из способов приспособляемости трактора для работы в условиях склонового земледелия может быть модификация рисунка протектора шин, что можно классифицировать как техническую новизну (Патент РФ №2330763). В результате проведенного анализа были поставлены задачи исследования.

Задачи диссертационных исследований:

1. Проанализировать способы проектно-теоретического и эксплуатационно-технологического развития средств для обеспечения курсовой устойчивости трактора при выполнении сельскохозяйственных операций в составе МТА.

2. Провести теоретические исследования силового баланса при взаимодействии элементов протектора с несущими грунтами в процессе движения машины по наклонной опорной поверхности.

3. Исследовать функциональные взаимосвязи между мощностью, реализуемой на курсовую устойчивость трактора, и конфигуративно-геометрическими параметрами рабочих элементов протектора колесного движителя.

4. Разработать способ интерактивного анализа изменения геометрических характеристик рабочих элементов протектора движителя колесного трактора при выполнении технологических операций.

5. Провести производственные исследования процесса отклонения экспериментального трактора от технологической траектории для различных ландшафтных условий при реализации заданных эксплуатационных режимов.

6. Дать технико-экономическое обоснование целесообразности развития и внедрения предлагаемого технического решения.

В главе 2 «Теоретическое обоснование методики определения влияния конфигуративно-параметрических характеристик протектора на процесс стабилизации траектории движения МТА» получены закономерности, определяющие связь между конструктивно-конфигуративными характеристиками грунтозацепа, характеристиками выполнения технологических операций и физико-механическими характеристиками опорного основания. Исследования были проведены в три этапа. Приоритетным рассматривалось установление математических зависимостей, отражающих условия возможности стабилизации трактора, оборудованного модернизированным протектором, для чего была разработана математическая модель движителя с эквивалентным расположением колес А и В (рис. 1), доступная для проведения анализа в соответствии с теорией А.М. Ляпунова.

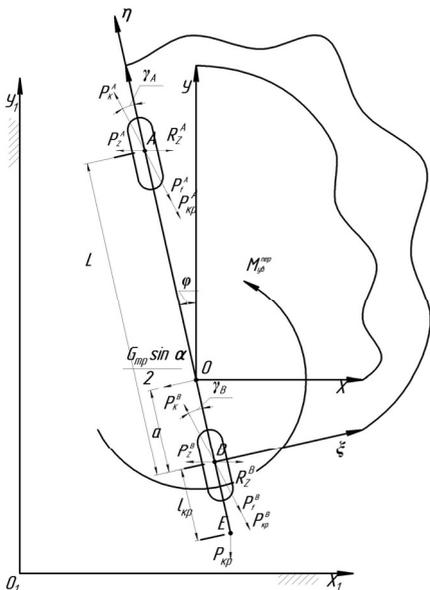


Рис. 1 – Силовая схема эквивалентного движителя:

P_K^A, P_K^B – касательные силы тяги, Н;

P_Z^A, P_Z^B – доля веса трактора, параллельная уклону, Н;

P_f^A, P_f^B – суммарные силы сопротивления качению, Н;

P_{kp}^A, P_{kp}^B – круговая нагрузка, Н;

R_Z^A, R_Z^B – суммарные боковые реакции в пятнах контакта, Н;

G_{mp} – вес трактора, Н;

γ_A, γ_B – углы увода (угловая деформация),

ϕ – суммарный угол увода, град;

M_{0}^{mp} – момент увода, Н/м;

a – расстояния от центра масс до задней оси трактора, м;

l_{kp} – координата расположения точки прицепа, м

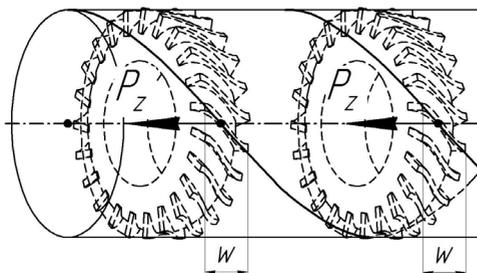


Рис. 2 – Схема взаимодействия колеса с опорным основанием в пятне контакта: W – ширина профиля шины, м

физического маятника. Соблюдение данного принципа исследований позволило определить условия процесса стабилизации дифференцированно для каждого моста, что является наиболее достоверным в рамках формализованного математического эксперимента.

При формировании математической модели алгоритм исследований был ориентирован на нахождение боковой составляющей, являющейся базовым силовым воздействием, удерживающим машину на заданной траектории. Полученное в результате системного анализа внешних сил дифференциальное уравнение колебаний переднего моста вдоль оси OX имеет вид:

$$m_A \ddot{x}_A = -P_K^A \cdot \gamma_A + P_f^A \cdot \gamma_A + P_{kp}^A \cdot \gamma_A - P_Z^A + P_{Ko}^A \quad (1)$$

и делает возможным определение силового воздействия на элементы движителя в рамках любых ландшафтных условий и состояния опорной поверхности.

При условии компенсации реализуемыми протектором реакциями возмущающих боковых усилий колебания трактора в поперечном направлении можно считать малыми и упругими. Вследствие чего для дальнейшей реализации аналитических процедур было сделано допущение – «боковое скольжение в пятне контакта, вызванное срывом почвенного кирпича, не происходит». Тогда боковая реакция почвы R_Z^A может быть представлена в виде:

$$R_Z^A = x_A \cdot k_{ypr.n}, \quad (2)$$

где x_A – упругое смещение эквивалентного колеса в поперечном направлении в результате сдвига и смятия почвы протектором в пятне их контакта, м; $k_{ypr.n}$ – коэффициент упругости почвы, Н/м.

Рассматривая уравнение (1) в аспекте теории А.М. Ляпунова с учетом локального диапазона амплитуд упругих колебаний, закономерно утверждать, что определение корректирующей силы при отклонении машины от заданной траектории может быть описано уравнением:

$$\ddot{x}_A - x_A \cdot \frac{k_{ypr.n}}{m_A} = \frac{P_{Ko}^A - P_K^A \cdot \gamma_A + P_f^A \cdot \gamma_A + P_{kp}^A \cdot \gamma_A - \frac{a \cdot G_{mp} \cdot \sin \alpha}{L}}{m_A}. \quad (3)$$

Результаты расчетов показали, что компенсация факторов увода возможна только в случае применения колес с одинаковой направленной конфигурацией протектора винтового типа, как на нижнем, так и на верхнем бортах (рис. 2).

С учетом того, что для определения условий устойчивого движения достаточно одной степени свободы, чем и является поперечное смещение трактора, любая колесная машина может быть рассмотрена в виде модели

Для удобства использования уравнения (3) в вычислительных процедурах и в результате математических преобразований окончательное его выражение имеет вид:

$$P_{K6}^A = P_K^A \cdot \gamma_A - P_f^A \cdot \gamma_A - P_{sp}^A \cdot \gamma_A + \frac{a \cdot G_{mp} \cdot \sin \alpha}{L}. \quad (4)$$

Как показали исследования, проведенные на основании установленных параметрических взаимосвязей, компенсация увода возможна в случае приближения к нулю функции начала стабилизации движения эквивалентного колеса, что соответствует отклонению ведущего моста от равновесного положения в поперечном относительно заданного курса направлении (с учетом пропорции распределения массы трактора по эквивалентным колесам передней и задней осей).

На втором этапе исследований было проведено математическое обоснование силового баланса, при котором происходит смещение машины на установленную величину при реализации мощностных показателей увода, адекватных массе машины, физико-механическим свойствам грунта и деформациям шин с серийными характеристиками.

$$N_{cn} = V \cdot \gamma \cdot P_Z \cdot tg \alpha, \quad (5)$$

где V – продольная составляющая вектора абсолютной скорости, км/ч;

γ – угловая деформация шины, рад;

P_Z – боковая составляющая веса трактора, Н;

α – угол наклона опорной поверхности, рад.

Графическая интерпретация N_{cn} для каждого колеса будет выглядеть следующим образом (рис. 3).

Заключительным этапом исследований явилось определение функции мощности стабилизации для условий реализации тягово-сцепных характеристик в диапазоне агротехнологических операций в склонном земледелии ($\alpha = 0,1 \dots 0,25$ рад) с учетом специфики грунтов ($\varphi = 0,5 \dots 0,6$; $f_{ck} = 0,72$; $\tau_{cp} = 17000$ Н/м²; $k_{\tau} = 0,052$ м; $f_n = 0,866$; $f_{np} = 0,68$) и схем перераспределения

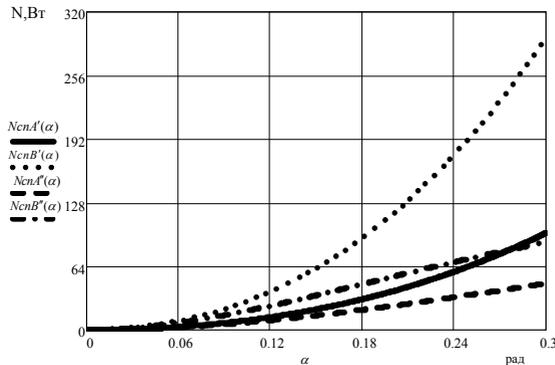


Рис. 3 – Мощность сползания N_{cn} на каждом колесе в зависимости от угла наклона опорной поверхности α

веса эксплуатируемых колесных машин. В развитии предложенной методики были установлены и формализованы способы определения конфигуративно-геометрических параметров протектора, включая оптимизацию кривой установки грунтозацепов, для формирования сбалансированных реакций стабилизации машины в технологическом коридоре, а также определение коэффициента стабилизации.

$$N_{cm} = \frac{r_K \cdot \omega_K \cdot (1 - \delta)}{tg\beta} \cdot \frac{C \cdot \frac{P_K \cdot \cos\beta \cdot \sin\beta + G \cdot a \cdot tg\alpha}{G \cdot a}}{1 - d \cdot \left(\frac{P_K \cdot \cos\beta \cdot \sin\beta + G \cdot a \cdot tg\alpha}{G \cdot a} \right)} \cdot P_K \cdot \cos\beta \cdot \sin\beta, \quad (6)$$

где $G = \frac{G_{mp}}{L} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \cos\alpha \pm \frac{1}{B} \cdot h \cdot \sin\alpha \right)$, «+» – для нижнего борта, «-» – для верхнего борта.

$$P_K = \left[\frac{f_{ck} \cdot k_\tau \cdot G_K}{\delta \cdot U} \ln ch \frac{\delta \cdot U}{k_\tau} - f_{np} \left(\frac{1}{ch \left(\frac{\delta \cdot U}{k_\tau} \right)} - 1 \right) + 2\tau_{cp} \frac{h_z \cdot U}{t} \right] - \text{касательная сила тяги}$$

с параметрами для каждого колеса отдельно.

Графическая интерпретация N_{cm} для всех колес представлена на рисунке 4. Для оценки степени компенсации возмущений нами введен стабилизирующий фактор:

$$k_{cm} = \frac{N_{cm}' - N_{cm}''}{N_{cm}' + N_{cm}''}. \quad (7)$$

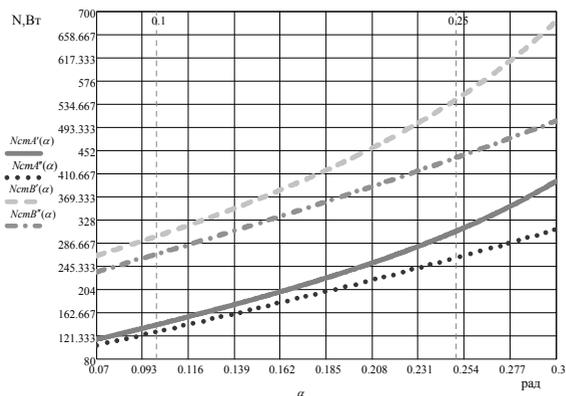


Рис. 4 – Мощность стабилизации N_{cm} на каждом колесе в зависимости от угла наклона опорной поверхности α

износа рабочих элементов движителя колесного трактора. Предложенный способ заключается в сравнении опытного и серийного протекторов в аспекте изменения контактной площади и силового воздействия на конфигуративно-геометрические характеристики их рабочих элементов для смоделированных условий эксплуатации машины ($\alpha 0,1 \dots 0,25$ рад; $\varphi 0,5 \dots 0,6$). При формализации предложенной методики особое внимание уделялось фактору трудоемкости в процессе реализации ремонтной технологичности и загруженности средств технического обслуживания на операции замены покрышек колесного движителя. В результате математической интерпретации было получено выражение:

Интенсивность изнашивания шин определяется их конструкцией и условиями работы. В результате взаимодействия шины с опорной поверхностью в первую очередь изнашивается протектор.

Поскольку при выполнении технологических операций постоянно происходит истирание верхних слоев формообразующих поверхностей протектора, в процессе проведения исследований был разработан и предложен способ интерактивного анализа функции

$$k = \frac{V_{\delta'}' \cdot \cos\beta' + \left(1 - \frac{V_{\delta''}'' \cdot \cos\beta''}{V_{\delta''}'' \cdot \left(2 + \frac{1}{1-\delta''} \right) \cdot \cos\beta''} \right)}{V_{\delta''}'' \cdot \cos\beta'' + \left(1 - \frac{V_{\delta'}' \cdot \cos\beta'}{V_{\delta'}' \cdot \left(2 + \frac{1}{1-\delta'} \right) \cdot \cos\beta'} \right)}, \quad (8)$$

которое устанавливает взаимосвязи между скоростями буксования, действительными скоростями $V_{\delta'}'$, $V_{\delta''}''$ и буксованием δ' , δ'' модернизированного и серийного протекторов соответственно. Преимуществом данной методики является отсутствие необходимости использования при экспертировании высокой частоты регистрации изменения конфигуративно-геометрических параметров рабочих элементов протектора и возможность использования локальной процедуры оценки состояния колес посредством коэффициента:

$$k = \frac{\delta_m \cdot (1 - \delta_c)}{\delta_c \cdot (1 - \delta_m)}. \quad (9)$$

Глава 3 «Методика экспериментальных исследований». В соответствии с задачей производственных исследований процесса отклонения трактора с модернизированным протектором от технологической траектории для различных ландшафтных условий при реализации заданных эксплуатационных режимов был разработан план многофакторного эксперимента (2⁴) (табл. 1):

Таблица 1 – План многофакторного эксперимента

Фактор	Скорость движения, м/с	Крюковое усилие, Н	Угол наклона опорной поверхности, рад.	Угол установки грунтозацепа, рад.
	V	$P_{кр}$	α	β
Переменные	X1	X2	X3	X4
Основной уровень	3	11750	0,175	0,611
Верхний уровень	3,5	14000	0,245	0,785
Интервал варьирования	0,5	2250	0,070	0,174
Нижний уровень	2,5	9500	0,105	0,436

В качестве выхода процесса (y) были определены: величина поперечного отклонения от заданной траектории, буксование, величина расхода топлива, угол поворота и угловая скорость поворота рулевого колеса, количество подурывающих воздействий в периоде корректировки траектории движения.

Для определения параметров выходов процессов было использовано специальное измерительное и регистрирующее оборудование: для измерения поступательной скорости агрегата, а также фактического пути, пройденного трактором – путеизмерительное колесо; для контроля расходуемого объема топлива в автоматическом режиме – расходомер ИП-260-2, агрегируемый с системой ИП-264; для определения тягового сопротивления прицепных

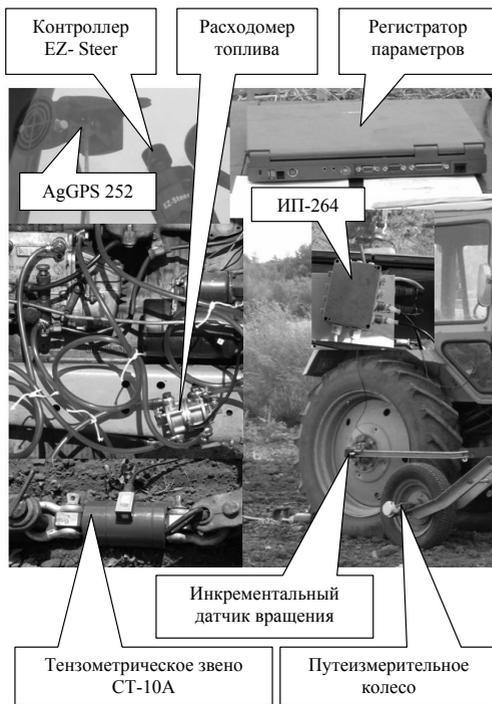


Рис. 5 – Испытуемый трактор с культиватором КПС-4

сельскохозяйственных машин в диапазоне усилия 10...100 кН – тензометрическое звено СТ-10А; для регистрации параметров основных энергетических характеристик испытываемого агрегата – персональный компьютер с программным обеспечением «Испытания».

Для создания крюкового сопротивления трактора МТЗ-82 (наработка более 150 моточасов) использовался культиватор КПС-4 (рис. 5), эксплуатация которого проводилась на двух почвенных фонах – стерне колосовых и на почве, подготовленной под посев в структуре суглинка с углами наклона в интервалах [0,09...0,12], [0,12...0,17], [0,17...0,21], [0,21...0,24] рад. Выбор экспериментального гона длиной [30...40] м проводился при значениях твердости опорной поверхности [3,0...3,5] МПа – стерня колосовых, [0,5...0,8] МПа – почва, подготовленная под посев и с влажностью [18–22]% на глубине 0,1 м.

Анализ функциональных характеристик рабочих элементов модернизированного образца двигателя в эксплуатационном режиме проводился в соответствии с ГОСТ 30745–2001 (ИСО 789-9-90).

Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием Microsoft Excel 2010, STATISTICA 10.

Как показала проверка полученных регрессионных моделей, проводившаяся по F-критерию Фишера (в диалоговом окне STATISTICA 10), все полученные выражения адекватно описывают исследуемые процессы и построены поверхности отклика, дающие представление о факторном пространстве, позволяющем провести формологическое исследование изучаемых процессов (рис. 6).

Буксование:

$$\begin{aligned}
 Y_{d_ster} = & 48,087 - 0,859 \cdot X_2 - 1,083 \cdot X_3 - 1,663 \cdot X_4 + 0,638 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\
 & - 0,274 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,222 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,687 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,553 \cdot X_2 \cdot X_4 - \\
 & - 0,461 \cdot X_3 \cdot X_4 + 1,027 \cdot X_2^2 + 1,6 \cdot X_3^2 + 1,837 \cdot X_4^2.
 \end{aligned} \quad (10)$$

Величина отклонения от заданной траектории:

$$Y_{d_ster} = 48,087 - 0,859 \cdot X_2 - 1,083 \cdot X_3 - 1,663 \cdot X_4 + 0,638 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\ - 0,274 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,222 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,687 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,553 \cdot X_2 \cdot X_4 - \\ - 0,461 \cdot X_3 \cdot X_4 + 1,027 \cdot X_2^2 + 1,6 \cdot X_3^2 + 1,837 \cdot X_4^2. \quad (11)$$

Часовой расход топлива:

$$Y_{d_ster} = 48,087 - 0,859 \cdot X_2 - 1,083 \cdot X_3 - 1,663 \cdot X_4 + 0,638 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\ - 0,274 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,222 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,687 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,553 \cdot X_2 \cdot X_4 - \\ - 0,461 \cdot X_3 \cdot X_4 + 1,027 \cdot X_2^2 + 1,6 \cdot X_3^2 + 1,837 \cdot X_4^2. \quad (12)$$

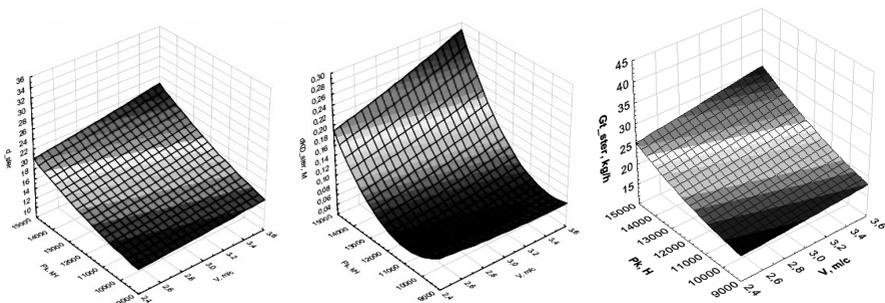


Рис. 6 – Поверхности отклика параметров оптимизации δ , ΔKD , Gt

Полученные результаты исследования для максимального поперечного склона, рекомендованного заводом-изготовителем (0,24 рад), показывают, что величина поперечных смещений в коридоре движения с обозначенными защитными зонами у экспериментального трактора меньше на 15–22% величины увода серийного трактора (при условии: $\varphi = 0,5...0,6$, уменьшение количества воздействий на органы управления – 27%, в интервале углов наклона опорной поверхности 0,1...0,17 рад). Кроме того, из-за меньшего подворота управляемых колес экспериментальный трактор расходует топлива меньше на 7,1%, чем серийный.

Сравнивая экспериментальные показатели серийной и модифицированной модели, можно констатировать специфику режима движения трактора с разработанным протектором в заданном технологическом коридоре. Если на поверхностях с углами до 0,17 рад для разных грунтов оба трактора, как серийный так и модернизированный, ведут себя в рамках агротехнологических требований, адекватных критическим пределам расчетных диапазонов в полнофакторном эксперименте, то на углах 0,17...0,25 рад режим движения экспериментального трактора стремится к уменьшению амплитуды колебаний относительно заданной траектории и снижению частоты подруливаний в сравнении с серийной моделью, т.е. «рыскание» машины начинает минимизироваться, чего не наблюдается при стандартном протекторе. Таким образом, при переходе машины в диапазон углов 0,17...0,25 интервалы режимных

показателей будут составлять соответственно: расход топлива – 16...21 кг/ч; величина буксования – 10...23%, что соответствует устойчивому движению агрегата в процессе выполнения технологических операций.

Глава 4 «Обоснование технико-экономической эффективности способа курсовой стабилизации колесного трактора при выполнении сельскохозяйственных операций в условиях склонового земледелия». Расчет экономической эффективности применения шин с модернизированным протектором показал, что полученный коэффициент потенциального резерва превосходит нормативный на углах склона от 0,09 до 0,24 рад, это свидетельствует о том, что разработка находится в зоне достаточной эффективности.

За счет применения модернизированного протектора величина поперечных смещений в коридоре движения снижается в зависимости от угла наклона опорной поверхности относительно серийной модели.

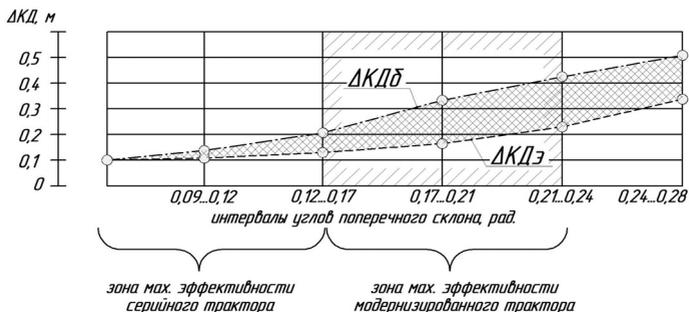


Рис. 7 – Зависимость величины поперечных смещений в коридоре движения от угла склона

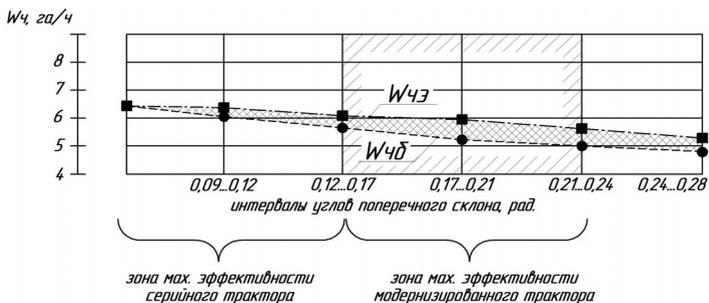


Рис. 8 – Зависимость производительности агрегата от угла склона

Производительность агрегата повышается за счет более точного выдерживания заданной технологической траектории.

Снижение расхода топлива происходит за счет сокращения частоты и длительности подруливаний.

Наиболее эффективно применение модернизированного колесного движителя на склонах 0,12...0,25 рад.

Проведенные производственные испытания подтвердили достоверность научно-методического подхода к разработке и внедрению технического ре-

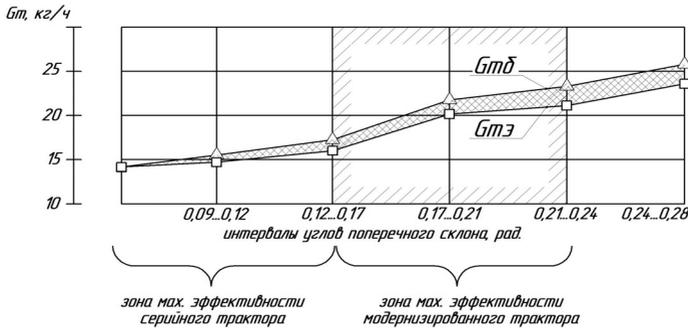
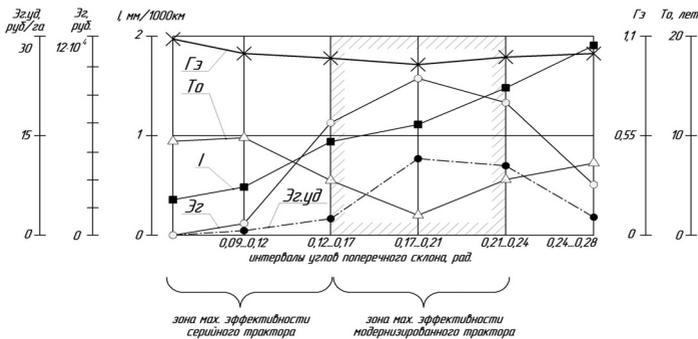


Рис. 9 – Зависимость расхода топлива от угла склона



- $\mathcal{E}_{г,уд}$ – годовая экономия с единицы объема работ, руб/га;
- $\mathcal{E}_г$ – годовая экономия, руб;
- I – интенсивность износа протектора, мм/1000 км;
- $\Gamma_э$ – граница эффективности модернизации;
- $T_о$ – срок окупаемости дополнительных капиталовложений, лет.

Рис. 10 – Технико-экономические показатели в функции угла наклона опорной поверхности

шения, обеспечивающего снижение бокового увода на 22%, что позволяет увеличить производительность на 6,3%. Экономическая эффективность внедрения технического решения составит 2139,5 руб. на трактор. Срок окупаемости затрат на модернизацию составляет 1,43 года.

Общие выводы

1. Анализ литературных источников и специализированной научно-проектной документации показал актуальность проблемы обеспечения курсовой устойчивости колесного трактора при выполнении сельскохозяйственных операций в условиях склонового земледелия. Специфика работы тракторов на наклонных опорных поверхностях, в том числе в составе МТА, предполагает наиболее приоритетным проведение исследований с целью оптимизации конструктивно-режимных параметров колесного движителя для обеспечения реакций, компенсирующих постоянное воздействие боковой составляющей веса транспортного средства, являющейся причиной его отклонения от тех-

нологической траектории, что становится прямым нарушением агротехнологических требований и причиной снижения урожайности на 4,7%.

2. В результате теоретических исследований обоснована возможность компенсации литерального силового воздействия на трактор, вызывающего его боковой увод из технологического коридора на наклонной опорной поверхности при углах $\alpha = 0,1-0,24$ рад для грунтов с (f_{ck} – коэффициент трения скольжения, f_{np} – приведенный коэффициент трения, k_c – коэффициент деформации, m , τ_{cp} – модуль среза).

3. Определена функция мощности N_{cm} адекватного силового потока, направленного на реализацию компенсационных боковых составляющих касательной силы тяги, обеспечивающих стабилизацию машины на технологической траектории для заданного коридора движения (1,8–2,4 м, при ширине междурядий 0,9 м) в пределах ширины защитных зон 0,3 м.

4. Установлены зависимости параметрических характеристик рабочих элементов колесного движителя (грунтозацепов) (t шаг – 83...161 мм, h_z высота – 35–52 мм, U длины площади контакта – 0,17–0,31 м) и функций их геометрической ориентации относительно продольной оси колеса в области пятна контакта для тракторов массой от 2500 до 5000 кг.

5. Разработана математическая модель процесса изнашивания рабочих элементов инновационного протектора для интерактивной технологической среды эксплуатации модернизированного трактора в пределах соотношения параметров коэффициент сцепления от 0,5 до 0,6 при $P_{cp\ const}$ среднем давлении в пятне контакта от 2900 до 4900 Н/м².

6. В результате проведения многофакторного эксперимента по схеме 2⁴ получили уравнения регрессии, адекватно описывающие зависимость δ , ΔKD , Gt от угла наклона опорной поверхности α , угла установки грунтозацепа β , величины крюковой нагрузки $P_{кр}$, почвенного фона φ и скорости движения V .

Проведение расчетных процедур в соответствии со значениями факторов для реальной экспериментальной базы (угла наклона опорной поверхности 0,1 рад, коэффициент сцепления $\varphi = 0,6$ и длине зачетной делянки 40 м) показало соответствие значений функций отклика как агротехнологическим требованиям, так и эксплуатационным характеристикам для экспериментальной сельскохозяйственной операции (поперечное отклонение трактора от заданной траектории 0,11 м, расход топлива 11 кг/ч, количество подруливающих воздействий 21, длительность воздействия 3 с на рулевое колесо).

7. В результате проведенных экспериментальных исследований собственной устойчивости колесного трактора в режиме выполнения сельскохозяйственных операций на наклонной опорной поверхности установлен интервал отклонений от заданной траектории $\Delta KD = 0,09...0,13$ м, что соответствует расчетным значениям для граничных условий эксплуатации предлагаемого технического решения.

8. Как показали производственные испытания, оптимизация углов установки грунтозацепов в пределах от 0,44 до 0,78 рад для различных ландшафтных условий с углом наклона опорной поверхности от 0,1 до 0,24 рад делает возможным реализовать мощность, утрачиваемую на буксование, для создания реакций, препятствующих уводу трактора от технологической траектории на величину более чем 0,13 м, при сохранении часового расхода топлива для трактора с серийным исполнением протектора.

9. В результате научно-производственных исследований установлено снижение бокового увода на 22% машинотракторного агрегата от технологической колеи при уменьшении количества корректирующих воздействий на управляющие органы энергетического модуля, что позволяет повысить качество реализации сельскохозяйственных операций в условиях ландшафтной нестабильности при увеличении производительности на 6,3%, уменьшение расхода топлива на 7,1%. Как показал технико-экономический анализ, эффективность внедрения инновационного протектора составит 2139,5 руб. на трактор. Срок окупаемости затрат на модернизацию составляет 1,43 года.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Стеновский, В.С. Адаптивный привод колесного движителя / В.С. Стеновский, А.А. Сорокин, А.А. Черкасов и др. // Сельский механизатор. – 2008. – №10. – С. 6.

2. Стеновский, В.С. К вопросу о снижении буксования колесной машины / В.С. Стеновский, Е.М. Асманкин, М.В. Завалий, А.А. Сорокин и др. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – №7. – С. 28–29.

3. Стеновский, В.С. Теоретическое обоснование способа стабилизации касательной силы тяги колесного движителя / В.С. Стеновский, Е.М. Асманкин, А.А. Сорокин, В.В. Реймер // Известия ОГАУ. – 2008. – №3. – С. 65–68.

4. Стеновский, В.С. Специфика концептуального развития технического обеспечения курсовой устойчивости колёсных / В.С. Стеновский, Е.М. Асманкин, В.В. Реймер, С.В. Юмакаева // Известия ОГАУ. – 2010. – №4. – С. 73–76.

5. Стеновский, В.С. Стабилизация транспортного средства на наклонной поверхности / В.С. Стеновский, В.В. Реймер, С.В. Юмакаева // Сельский механизатор. – 2011. – №5. – С. 12.

в других изданиях:

6. Стеновский, В.С. Технико-экономический аспект на проблему совершенствования колесного движителя / В.С. Стеновский, Ю.А. Коровин, А.А. Сорокин // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Совершенствование инженерно-технического обеспечения технологических процессов в АПК». – Оренбург: Вестник Оренбургэнерго, 2005. – С. 87–89.

7. Стеновский, В.С. Методика обоснования контактной площади ведущих колес механизма модернизированного движителя / В.С. Стеновский, Н.В. Маловская, С.Н. Дроздов // Совершенствование инженерно-технического обеспечения технологических процессов в АПК: сборник докладов международной научно-практической конференции. – Оренбург, 2005.

8. Стеновский, В.С. Анализ физической модели взаимодействия движителей сельскохозяйственных машин с почвой / П.А. Иванов, А.А. Сорокин, В.С. Стеновский // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Совершенствование инженерно-технического обеспечения технологических процессов в АПК». – Оренбург: Вестник Оренбургэнерго, 2005. – С. 57–60.

9. Стеновский, В.С. Методы повышения тягово-сцепных и динамических свойств колесных тракторов / В.С. Стеновский // Материалы региональной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Оренбургской области. Ч. 1. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2005. – С. 129–131.

10. Стеновский, В.С. Оценка тягово-сцепных качеств движителей мобильных машин с учетом физико-механических свойств почв / П.А. Иванов, Н.В. Маловская, В.С. Стеновский // Региональная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2005.

11. Стеновский, В.С. К проблеме оценки взаимодействия элементов системы «двигатель – опорная поверхность» / В.С. Стеновский // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Совершенствование инженерно-технического обеспечения технологических процессов в АПК». – Оренбург: Вестник Оренбургэнерго, 2005. – С. 127–130.

12. Стеновский, В.С. Параметрическая функция геометрических характеристик элементов движителя в аспекте вероятностно-статистических внешних возмущений / Н.А. Маловский, П.А. Иванов, В.С. Стеновский, В.В. Реймер // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2006. – №4.

13. Стеновский, В.С. Физико-техническая специфика обоснования процесса формирования силы тяги / В.Е. Медведев, П.А. Иванов, В.С. Стеновский // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2006. – №4.

14. Стеновский, В.С. Роль и актуальность освоения и обработки почв, расположенных на склонах. Перспективы реализации курсовой устойчивости колесных машин в условиях изменяющегося угла наклона опорной поверхности / В.С. Стеновский, В.В. Реймер // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Роль природообустройства сельских территорий в обеспечении устойчивого развития АПК». – М., 2007.

15. Стеновский, В.С. Проблемы технического инновационирования при разработке современных технологий и средств механизации сельского хозяйства / В.С. Стеновский, С.В. Юмакаева, И.В. Яковлев // Аграрная наука и образование в условиях становления инновационной экономики: материалы международной научно-практической конференции. Ч. II / под общ. ред. проф. Г.В. Петровой. – Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2012. – 123–125 с.

16. Стеновский, В.С. Методика формализации дестабилизирующего момента колесного движителя / В.С. Стеновский, И.А. Рахимжанова, В.В. Реймер, С.В. Юмакаева // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники: материалы международного научно-технического семинара имени В.В. Михайлова. – Вып. 25. – Саратов: Издательство «КУБиК», 2012. – 308 с.

17. Стеновский, В.С. Стабилизация траектории движения МТА за счет конфигуративно-параметрических характеристик протектора колеса / В.С. Стеновский // Совершенствование инженерно-технического обеспечения технологических процессов в АПК: материалы международной научно-практической конференции / под ред. Ю.А. Ушакова. – Оренбург, 2013. – 160–163 с.

18. Стеновский, В.С. Перспективное направление развития колесных тракторов в АПК / В.С. Стеновский, Н.В. Богачев // Студенты и аспиранты в науке – 2012: материалы VI научно-практической конференции. – Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2013.

19. Пат. 2330763 Российская Федерация МПК7 В60С11/113. Протектор пневматической шины / Стеновский В.С. и др. № 2006131976/11, заявл. 05.09.2006; опубл. 10.08.2008.

20. Пат. 2399538 Российская Федерация МПК7 В62D37/04. Способ стабилизации положения колесного транспортного средства / Стеновский В.С. и др. № 2008146172, заявл. 21.11.2008; опубл. 20.09.2010.

Стеновский Вячеслав Сергеевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖИТЕЛЯ
КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ
НА НЕГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства
механизации сельского хозяйства
Специальность 05.20.03 – Технологии и средства технического
обслуживания в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 02.10.2014.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,0. Печать оперативная.
Бумага офсетная. Заказ № 7437. Тираж 100 экз.

Издательский центр ОГАУ
460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18. Тел.: (3532) 77-61-43
Отпечатано в Издательском центре ОГАУ