На правах рукописи

ЯКОВЛЕВ ПАВЕЛ ЮРЬЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА С ФРОНТАЛЬНО НАВЕШЕННЫМ ОРУДИЕМ ЗА СЧЕТ МОДЕРНИЗАЦИИ НАВЕСНОГО УСТРОЙСТВА

Специальность: 05.20.01 - Технологии и средства механизации сельского хозяйства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Барнаул – 2014

Работа выполнена на кафедре «Наземные транспортные системы» Рубцовского индустриального института (филиал) ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Площаднов Александр Николаевич
(Рубцовский индустриальный институт (филиал) ФГБОУ ВПО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова)

Официальные оппоненты: **Докин Борис Дмитриевич**
доктор технических наук, профессор (ГНУ СибИМЭ СО Россельхозакадемии)

Федюнин Павел Иванович
кандидат технических наук, доцент
(ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет»)

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет»

Защита состоится «**11» июня 2014 г. в 13.00 часов** на заседании диссертационного совета Д212.004.02 в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, проспект Ленина, 46.

htpp//www.altstu.ru; e-mail:ntsc@desert.secna.ru
тел/факс 8(3852) 36-71-29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Автореферат разослан « » апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор Куликова Лилия Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из перспективных направлений современного развития сельского хозяйства является создание комбинированных машинно-тракторных агрегатов (МТА), состоящих из тягового средства, фронтального и задненавесного орудий. Такие агрегаты, совершая несколько операций за один проход, экономят человеческие и топливно-энергетические ресурсы, защищают почву от чрезмерного разрушения и уплотнения, увеличивают производительность труда, максимально загружают энергонасыщенные тракторы и т.д. Однако использование таких агрегатов создаёт определённые проблемы, главная из которых - отрицательное влияние фронтально навешенного орудия на устойчивость и управляемость машинно-тракторного агрегата в процессе движения. При недостаточной управляемости и устойчивости движения машинно-тракторного агрегата с фронтальной навеской невозможно достичь высоких технико-экономических показателей, что в свою очередь затрудняет их использование либо делает экономически нецелесообразным.

За счет применения в конструкции механизма навесного устройства упругого элемента обеспечивается нежесткое соединение орудия с трактором. Это, с одной стороны, создает возможность поворота орудия в ту же сторону, что и управляемые колеса трактора, и улучшает управляемость и устойчивость движения агрегата за счет уменьшения сил сопротивления от орудия при повороте, с другой стороны - обеспечивает возврат орудия в нейтральное положение.

В связи с этим, проведение теоретических и экспериментальных исследований движения трактора с фронтально навешенным орудием (ФНО) и упругим элементом в навесной системе, выбор рациональных конструктивных параметров навесного механизма и упругого элемента, способных повысить управляемость и устойчивость движения МТА, является актуальной задачей.

Целью работы является обеспечение высоких показателей управляемости машинно-тракторного агрегата с фронтальным почвообрабатывающим орудием, при одновременном сохранении устойчивости его движения, за счет снижения негативного влияния сил сопротивления со стороны орудия на поворот агрегата при маневрировании в междурядьях пропашных культур.

Объект исследования. Машинно-тракторный агрегат, включающий в себя энергетическое средство, приспособление для фронтального навешивания культиваторов и культиватор.

Предмет исследования. Процесс движения машинно-тракторного агрегата с фронтально навешенным орудием.

Методология и методы исследования. Математическое моделирование физических процессов, теоретические основы механических колебаний, экспериментальные исследования.

Научную новизну представляют:

- конструкция навесного механизма, обеспечивающего устойчивость движения фронтально навешенного орудия относительно трактора и повышающего управляемость и устойчивость движения всего агрегата;

- математическая модель, описывающая движение фронтально навешенного орудия относительно трактора;

- математическая модель, описывающая движение машинно-тракторного агрегата в составе энергетического средства и фронтально навешенного культиватора;

- условия выбора рационального соотношения между управляемостью агрегата и практической устойчивостью орудия для обеспечения наилучшего процесса движения МТА.

Практическая ценность. Разработана и запатентована конструкция механизма навесного устройства, которая обеспечивает устойчивость движения ФНО относительно трактора, а также способствует повышению управляемости агрегата при маневрировании в междурядьях пропашных культур.

Реализация результатов работы. Методические рекомендации по применению машинно-тракторных агрегатов с фронтально навешенным культиватором переданы в Управление по промышленности, энергетике, транспорту, развитию предпринимательства и труду Администрации г. Рубцовска. Выводы и методические рекомендации по данной работе используются в ОАО «Рубцовский проектно-конструкторский технологический институт». Результаты полученных исследований внедрены в учебный процесс кафедры «Наземные транспортные системы» Рубцовского индустриального института (филиала) АлтГТУ им. И.И. Ползунова.

Апробация работы. Основные материалы и научные результаты работы докладывались на Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы социального и научно-технического развития в современном мире» (г.Рубцовск 2003г, 2007г., 2009г-2013г.); Всероссийской научно-технической конференции «Современные тенденции развития автомобилестроения в России» (г.Тольятти 2005г.); Всероссийской научно-технической конференции «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы» (г.Рубцовск 2011г., 2012г.); Международной научно-практической инновационно-инвестиционной конференции «МИИК - 2012» (г.Рубцовск 2012г.).

Диссертационная работа выполнялась при поддержке стипендии (гранта) Президента РФ аспирантам и молодым ученым, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям российской экономики на 2013-2015г.г. (грант СП-5869.2013.1).

Основные положения, выносимые на защиту:

- математическая модель движения орудия относительно трактора, с выбором наиболее рациональных параметров данного движения;

- математические модели движения орудия, соединённого с трактором через П-образный элемент и непосредственно через тяги;

- математическая модель движения агрегата в составе энергетического средства и фронтально навешенного орудия, с приспособлением для фронтального агрегатирования;

- способ, обеспечивающий устойчивость движения орудия относительно трактора и позволяющий повысить управляемость и устойчивость движения всего агрегата;

- методика выбора рациональных параметров управляемости и устойчивости движения агрегата с фронтальным орудием.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых изданиях, входящих в Перечень ВАК, а также получено 3 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит введение, четыре главы и общие выводы. Текст диссертации изложен на 128 страницах, включает 48 рисунков, 96 наименований используемой литературы и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено краткому рассмотрению современного состояния проблемы, обоснована актуальность исследования, сформулирована цель диссертационной работы, а также представлены основные положения работы, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу преимуществ, выявлению проблем и путей их решения при использовании комбинированных машинно-тракторных агрегатов с фронтальным- и задненавесным орудиями для обработки почвы.

Применение комбинированных машинно-тракторных агрегатов дает такие преимущества, как: снижение расхода топлива до 30%; снижение затрат труда на 30-50%; повышение урожайности на 10-15% за счет снижения уплотнения почвы, вследствие уменьшения числа проходов МТА по полю; сокращения сроков выполнения сельскохозяйственных работ и т.д.

Главной проблемой, ограничивающей применение таких комбинированных агрегатов, является отрицательное влияние фронтально навешенных почвообрабатывающих орудий на устойчивость и управляемость МТА в процессе его движения. Это происходит вследствие того, что точка прицепа (крепления) орудия к тягово-транспортному средству расположена позади этого орудия. В данном случае трактор толкает орудие перед собой, а это, даже при небольшом смещении линии действия суммарной силы сопротивления машины от средней линии хода агрегата, вызывает появление отклоняющего момента, стремящегося увести агрегат от заданного направления движения.

Проблеме управляемости и устойчивости движения колесных машин посвящено значительное количество работ: Я.М Певзнера, И.Е. Донцова, Н.Е. Жуковского, Е.А. Чудакова, А.С. Литвинова, Ю.А. Брянского, Д.А. Антонова, Я.Е. Фаробина, А.А. Гашенко, В.С. Фалькевича, П.М. Василенко, А.Б. Лурье, Л.В. Гячева, В.Ф. Коновалова, А.В. Рославцева, П.П. Давиденко, В.В. Гуськова, Ю.А. Ганькина, Е.Ф. Дворцова, А.С. Павлюка, А.Н. Площаднова и др.

При решении поставленной проблемы следует учитывать, что у многих авторов устойчивость и управляемость – это два понятия, неразрывно связанные друг с другом, и следует четко определить их для каждого типа объекта исследования. Поэтому необходимо в первую очередь дать не только четкое определение этих понятий, но и выбрать критерий, позволяющий количественно оценить каждое из свойств.

В данной работе примем следующие определения: устойчивость - способность сохранять заданное направление движения, несмотря на воздействие воз-

мущающих сил, стремящихся вывести объект из состояния равновесия, а также способность объекта возвращаться к первоначальному состоянию после прекращения возмущающего воздействия; управляемость - комплекс свойств машинно-тракторного агрегата, позволяющих ему адекватно реагировать на управляющее воздействие.

На основе проведенного анализа проблем использования агрегатов с фронтальной навеской, для решения поставленной цели работы определены следующие задачи:

1. Рассмотреть кинематику движения механизма фронтальной навески, вывести необходимые для использования в расчетах закономерности.

2. Предложить способ, обеспечивающий устойчивое положение орудия, при его фронтальном навешивании, и позволяющий повысить управляемость движения агрегата при выполнении технологических операций по обработке пропашных культур.

3. Разработать математическую модель движения фронтальной навески относительно остова трактора.

4. Разработать математическую модель движения машинно-тракторного агрегата в составе энергетического средства и культиватора, навешенного с помощью приспособления для фронтального агрегатирования, сравнить управляемость движения трактора с упругим и с жестко закрепленным орудием.

5. Разработать и обосновать методику проведения испытаний машинно-тракторного агрегата с фронтальной навеской при выполнении технологического процесса по обработке междурядий пропашных культур.

6. Провести полевые испытания машинно-тракторного агрегата с приспособлением для фронтального агрегатирования.

7. Разработать рекомендации, позволяющие выбрать рациональное соотношение параметров устойчивости движения орудия относительно трактора и параметров управляемости машинно-тракторного агрегата.

Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям движения агрегата в составе трактора и фронтально навешенного орудия. Рассмотрена кинематика движения механизма навески, получены необходимые кинематические зависимости, используемые при составлении модели движения фронтально навешенного орудия. Составлена математическая модель движения МТА при упругом присоединении фронтального орудия и трактора. Предложена методика выбора рационального параметра по критерию практической устойчивости движения орудия относительно трактора.

Основные силы, вызывающие дестабилизирующее воздействие на машинно-тракторный агрегат, – это силы сопротивления рабочих органов почвообрабатывающих машин. При маневрировании МТА в рядках пропашных культур возникает необходимость в периодической корректировке направления движения, что в свою очередь вызывает отклонение вектора скорости рабочего органа от плоскости его симметрии, а это значительно увеличивает момент сопротивления повороту агрегата. Уменьшить его можно путем обеспечения поворота орудия в сторону поворота агрегата, за счет свободного соединения орудия с трактором, ограничивая при этом поворот орудия упругим элементом в системе

навески, момент, от действия которого, создается силой $F_{УПР}$ (рисунок 1).

При составлении уравнений колебаний, учитывающих присутствие колес с упруго-деформируемыми шинами, процесс затухания возмущений описывается дифференциальным уравнением третьего порядка, характеристическое уравнение которого:

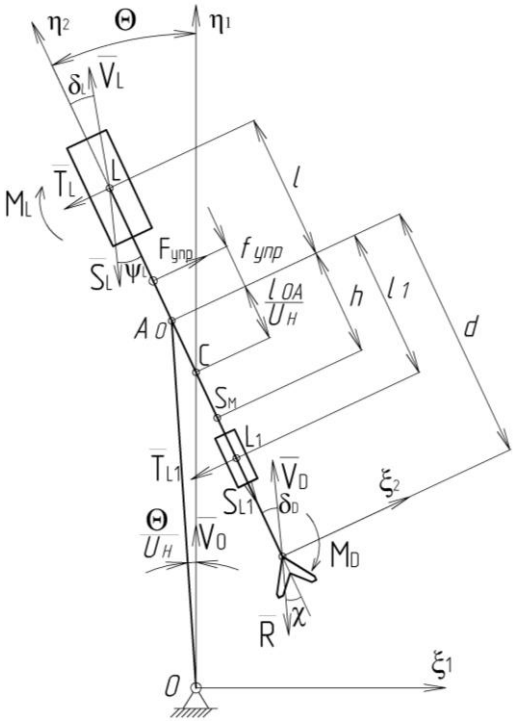

Рисунок 1. Расчетная модель фронтально навешенного культиватора с упругим элементом в системе навески

$$\dddot{\Theta}\cdot c_0+\ddot{\Theta}\cdot c_1+\dot{\Theta}\cdot c_2+\Theta\cdot c_3=0, \qquad (1)$$

где c_0, c_1, c_2, c_3, - коэффициенты, учитывающие силовые и механические параметры орудия.

По теореме Гурвица устойчивость движения системы обеспечивается, если выполнены следующие условия:

$$\begin{cases} c_0>0, c_1>0, c_2>0, c_3>0; \\ c_1\cdot c_2-c_3\cdot c_0>0. \end{cases} \qquad (2)$$

Благодаря наличию силы от действия упругого элемента, возможно не только выполнение условия (2), и как следствие этого устойчивое положение ФНО относительно трактора, но и обеспечение наиболее рационального процесса затухающих колебаний. Согласно рекомендациям Л.В. Гячева, выбор рациональных параметров коэффициентов заключатся в обеспечении условия:

$$\lambda\le 1, \qquad (3)$$

где λ - показатель переходного процесса.

Была выявлена зависимость, позволяющая установить тип переходного процесса для уравнения (1), представляющая собой соотношение двух коэффициентов указанного уравнения:

$$\lambda=\frac{c_2}{c_3}. \qquad (4)$$

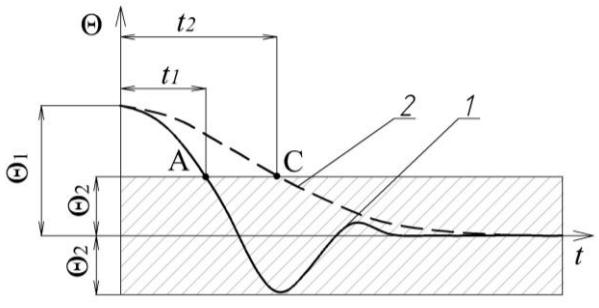

Рисунок 2. График колебаний фронтально навешенного орудия: 1 – затухающие колебания, близкие по своему значению к предельному апериодическому движению; 2 – апериодическое движение

В этом случае колебания орудия будут носить затухающий характер, и, как видно по кривой 1 (рисунок 2), это условие будет являться рациональным. В этом случае время (t_1), а следовательно, и путь, пройденный в отклоненном состоянии, будут наименьшими.

Оценку практической устойчивости движения орудия удобно выражать в долях основного размера машины - её длины:

$$\sigma = \frac{l_{C_0D}}{S}, \tag{5}$$

где l_{C_0D} - расстояние от орудия то точки мгновенного центра вращения; S - путь возмущенного движения.

Благодаря применению упругого элемента, в системе навески обеспечивается как выполнение условий (2) и (3), так и управляемость агрегата при его движении в междурядьях.

Рассмотрим установившееся движение МТА с фронтальной навеской с жестким и упругим креплением орудия (рис. 3). Для обеспечения условия управляемости трактора необходимо, чтобы момент сопротивления повороту $M_{СОП}$ был меньше поворачивающего момента $M_{ПОВ}$:

$$K_{УПР} = \frac{M_{СОП}}{M_{ПОВ}} \le 1. \tag{6}$$

На момент сопротивления повороту агрегата, главным образом, влияет момент сопротивления от орудия, поэтому, в первом приближении, остальными составляющими пренебрегаем:

$$M_{СОП} = \left(R \cdot \alpha_0 \cdot l_D + \beta_0\right) \cdot \delta_{ОР}, \tag{7}$$

где l_D – расстояние от оси задних колес до рабочего органа; $\delta_{ОР}$ – угол отклонения вектора скорости орудия относительно плоскости орудия.

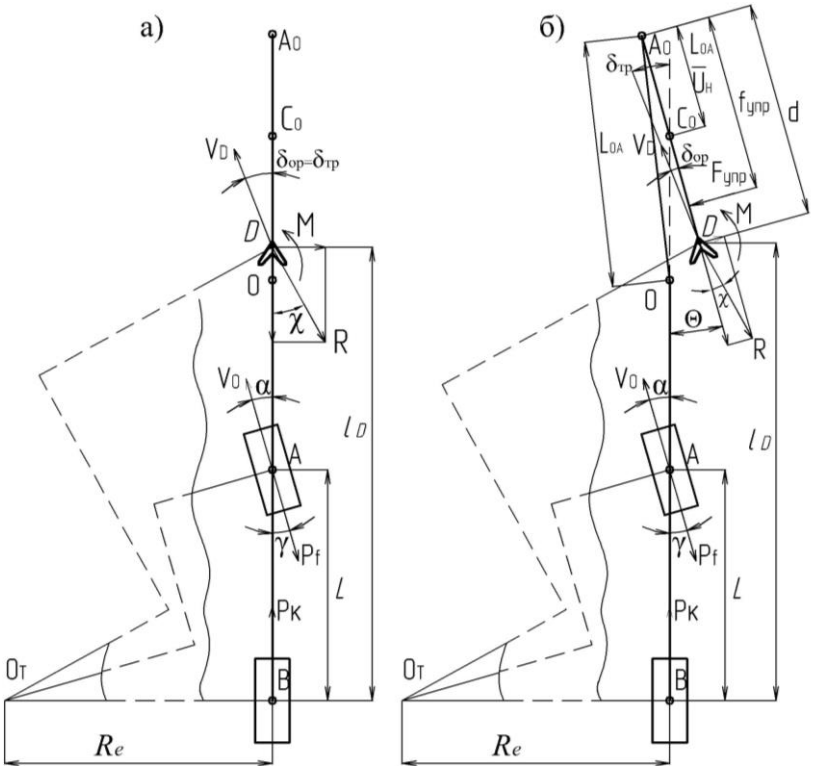

Рисунок 3. Схема сил, действующих на МТА с фронтальной навеской:
а – жесткое присоединение орудия; б – упругое присоединение орудия

При жестком соединении ФНО с трактором угол отклонения вектора скорости орудия от его плоскости симметрии будет равен $\delta_{ТР} = \delta_{ОР}$, а при упругом соединении будет выполняться условие:

$$\delta_{TP} = \frac{l_D}{R_e} = \delta_{OP} + \Theta, \tag{8}$$

где δ_{TP} – угол отклонения вектора скорости орудия относительно плоскости симметрии трактора; δ_{OP} – угол отклонения вектора скорости орудия относительно плоскости симметрии орудия; Θ – угол поворота орудия; R_e – радиус траектории движения.

Момент сопротивления повороту орудия, от действия упругого элемента, относительно точки C_0 (рис. 3):

$$M_{УПР} = c_Ж \cdot \Theta \cdot \left(f_{УПР} - \frac{l_{OA}}{U_H} \right)^2. \tag{9}$$

Момент, вызывающий поворот орудия относительно точки C_0 (рис. 3):

$$M_\chi = \left(R \cdot \alpha_0 \cdot \left(d - \frac{l_{OA}}{U_H} \right) + \beta_0 \right) \cdot \delta_{OP}. \tag{10}$$

Решая совместно уравнения (8), (9) и (10), найдем значение максимального угла отклонения орудия Θ, которое будет при условии равенства момента от действия сил сопротивления и момента от действия упругого элемента:

$$\Theta = \frac{\left(R \cdot \alpha_0 \cdot \left(d - \frac{l_{OA}}{U_H} \right) + \beta_0 \right) \cdot \frac{l_D}{R_e}}{c_Ж \cdot \left(f_{УПР} - \frac{l_{OA}}{U_H} \right)^2 + \left(R \cdot \alpha_0 \cdot \left(d - \frac{l_{OA}}{U_H} \right) + \beta_0 \right)}. \tag{11}$$

На рисунке 4 изображены графики, показывающие величину максимального угла поворота управляемых колес при разных способах присоединения фронтально навешенного орудия.

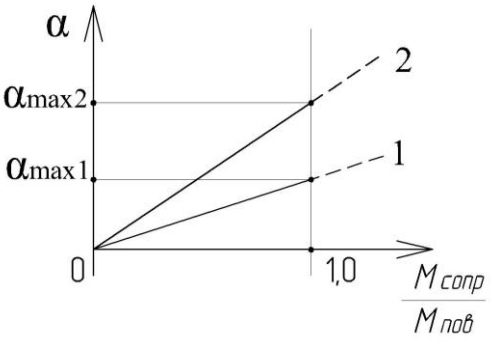

Рисунок 4. Зависимость между углом поворота управляемых колес трактора и моментом сопротивления от орудия

Прямая 1 соответствует жесткому закреплению орудия, прямая 2 соответствует упругому креплению орудия. Благодаря упругому соединению орудия с трактором уменьшается момент сопротивления повороту вследствие уменьшения угла χ и связанного с ним главного вектора сил сопротивления R, и, как следствие этого, увеличивается управляемость МТА.

При движении МТА по прямолинейной траектории причиной, стремящейся вывести МТА из положения равновесия, также будет являться момент от действия сил сопротивления фронтально навешенного орудия. Стоит уточнить, что если в первом случае дестабилизирующий момент, главным образом, возникает из-за отклонения вектора скорости орудия относительно плоскости его симметрии вследствие поворота управляемых колес трактора, то при прямолинейном движении данный момент возникает из-за неоднородности сопротивления по краям культиваторных лап и неоднородности сопротивления почвы.

Количественно оценить устойчивость можно по отношению стабилизиру-

ющего момента $M_{СТАБ}$ к возмущающему моменту $M_{ВОЗМ}$:

$$K_{УСТ} = \frac{M_{СТАБ}}{M_{ВОЗМ}}. \qquad (12)$$

Для сравнительной оценки гораздо удобнее рассмотреть соотношение коэффициентов устойчивости в случае жесткого и упругого присоединения орудия к трактору:

$$\frac{K_{УСТ.Ж}}{K_{УСТ.УПР}} = 1 - \frac{\Theta}{\delta_{ТР}}. \qquad (13)$$

Математическая модель движения агрегата, с упругим присоединением фронтально навешенного культиватора, описывается уравнениями Лагранжа второго рода. При этом принимались допущения, традиционные при моделировании управляемого движения МТА. Расчетная схема движения агрегата представлена на рисунке 5.

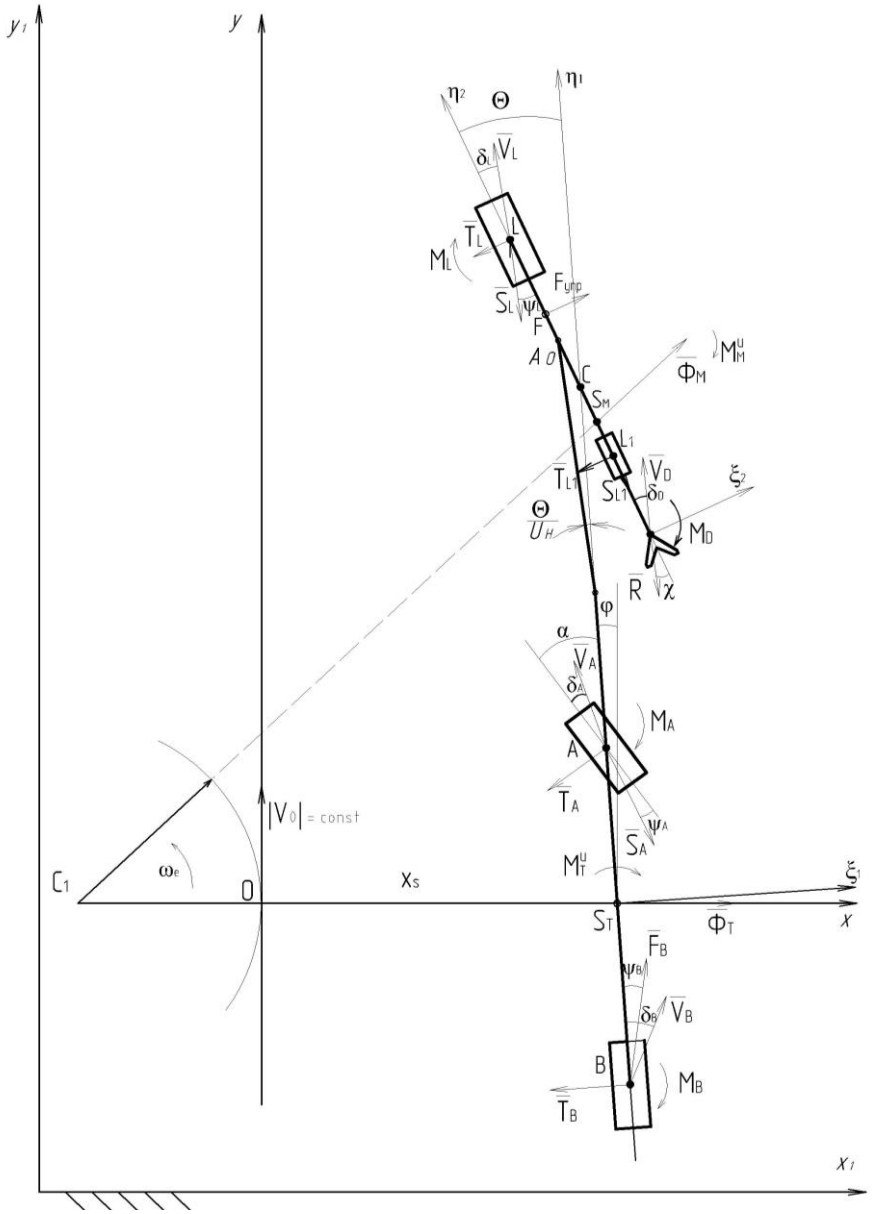

Рисунок 5. Расчетная схема движения машинно-тракторного агрегата с фронтально навешенным культиватором

Положение агрегата в пространстве определяется тремя обобщенными координатами: бокового смещения центра масс трактора x_S, углового отклонения продольной оси трактора φ и углового отклонения орудия Θ. Соответственно, количество уравнений динамики плоского движения в системе отсчета *xOy*, согласно методу Лагранжа, равно трем:

$$\begin{cases} Q_{x_S} + L_{x_S} + R_{x_S} = -T_B + F_B \cdot (\psi_B - \varphi) + \Phi_T - T_A + \\ + S_A \cdot (\varphi + \alpha - \psi_A) + \Phi_M - T_L - T_{L_1} + S_L \cdot (\varphi + \Theta - \psi_L) + \\ + S_{L1} \cdot (\varphi + \Theta) + R \cdot (\varphi + \Theta - \chi); \\ Q_{\varphi_1} + L_{\varphi_1} + R_{\varphi_1} = -T_B b + F_B \cdot b \cdot \psi_B - M_B - M_T^u + T_A \cdot a - S_A \cdot a \cdot (\alpha - \psi_A) - \\ - M_A - \Phi_M \cdot (c + l_{OA} - h) - M_M^u + T_L \cdot (c + l_{OA} + l) + T_{L_1} \cdot (c + l_{OA} - l_1) + \\ + S_L \cdot \left[-(c + l_{OA} + l) \cdot (\Theta - \psi_L) + \left(l + \frac{l_{OA}}{U_H} \right) \cdot \Theta \right] - M_L - S_{L_1} \cdot (c + l_{OA} - l_1) \cdot \Theta - \\ - R \cdot \left[(c + l_{OA} - d) \cdot (\Theta - \chi) + \left(d - \frac{l_{OA}}{U_H} \right) \cdot \Theta \right] - M_D; \\ Q_{\varphi_2} + L_{\varphi_2} + R_{\varphi_2} = \frac{R \cdot l_{OA}}{U_H} \cdot \left(\chi - \Theta + \frac{\Theta}{U_H} \right) - R \cdot d \cdot \chi - M_D - T_{L_1} \cdot \left(l_1 - \frac{l_{OA}}{U_H} \right) + \\ + T_L \cdot \left(\frac{l_{OA}}{U_H} + l \right) + \Phi_M \cdot \left(h - \frac{l_{OA}}{U_H} \right) + S_L \cdot \left(\frac{l_{OA}}{U_H} \cdot \left(\psi_L + \frac{\Theta}{U_H} - \Theta \right) + l \cdot \psi_L \right) - \\ - S_{L1} \cdot \left(\frac{l_{OA}}{U_H} \left(\Theta - \frac{\Theta}{U_H} \right) \right) - M_M^u - M_L \end{cases} \quad (14)$$

Дополняя систему уравнений (14) уравнениями неголономных связей между деформациями и скоростями деформации шин и обобщенными координатами и их скоростями, получим систему линейных дифференциальных уравнений, описывающих движение агрегата с фронтально навешенным орудием:

$$\begin{cases} a_0 \dddot{\varphi} + a_1 \ddot{\varphi} + a_2 \dot{\varphi} + a_3 \varphi + a_4 \dddot{\Theta} + a_5 \ddot{\Theta} + a_6 \dot{\Theta} + a_7 \Theta + \\ + a_8 \ddot{x}_S + a_9 \ddot{x}_S + a_{10} \dot{x}_S + a_{11} \dot{\alpha} + a_{12} \alpha + a_{13} \ddot{\pi}_e + a_{14} \dot{\pi}_e + a_{15} \pi_e = 0 \\ b_0 \dddot{\varphi} + b_1 \ddot{\varphi} + b_2 \dot{\varphi} + b_3 \varphi + b_4 \dddot{\Theta} + b_5 \ddot{\Theta} + b_6 \dot{\Theta} + b_7 \Theta + \\ + b_8 \ddot{x}_S + b_9 \ddot{x}_S + b_{10} \dot{x}_S + b_{11} \dot{\alpha} + b_{12} \alpha + b_{13} \ddot{\pi}_e + b_{14} \dot{\pi}_e + b_{15} \pi_e = 0 \\ c_0 \dddot{\varphi} + c_1 \ddot{\varphi} + c_2 \dot{\varphi} + c_3 \varphi + c_4 \dddot{\Theta} + c_5 \ddot{\Theta} + c_6 \dot{\Theta} + c_7 \Theta + \\ + c_8 \ddot{x}_S + c_9 \ddot{x}_S + c_{10} \dot{x}_S + c_{11} \ddot{\pi}_e + c_{12} \dot{\pi}_e + c_{13} \pi_e = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Третья глава посвящена описанию целей, задач и методике проведения полевых экспериментальных исследований движения агрегата в составе трактора и фронтально навешенного орудия. Приведено описание объекта исследований, условий полевых испытаний, измерительного оборудования.

Цели экспериментальных исследований заключаются в следующем:

- оценка возможности использования в системе навески упругого элемента, способного обеспечить устойчивое положение фронтально навесного орудия относительно трактора;

- сравнение устойчивости движения агрегата, снабженного упругим элементом в системе навески, с трактором на холостом ходу и с агрегатом с жестко закреплённым фронтальным орудием;

- оценка возможности обеспечения управляемости агрегата за счет уменьшения угла отклонения вектора скорости движения рабочего органа орудия от плоскости его симметрии, благодаря возможности отклонения фронтального орудия в сторону поворота управляемых колес трактора;

- оценка адекватности математической модели.

При экспериментальных исследованиях устойчивости движения МТА в междурядьях, имитирующих посадки пропашных культур, в качестве объекта исследования использовалось тягово-транспортное средство класса 6 кН с фронтально навешенным культиватором КОН-2,8 и приспособлением с упругим элементом в системе фронтальной навески (рисунок 6).

а)

б)

Рисунок 6. Исследуемый МТА с фронтально навешенным культиватором и упругим элементом в системе навески: а - общий вид; б - навесное устройство с орудием

С целью подтверждения достоверности решения системы диффе-

Рисунок 7. Крепление измерительной и регистрирующей аппаратуры в кабине машинно-тракторного агрегата: 1 – предварительный усилитель ZET–412; 2 – модуль аналого–цифрового и цифро–аналогового преобразования ZET–220; 3 – ноутбук

ренциальных уравнений движения МТА в междурядьях было проведено сравнение траекторий, полученных аналитическим и экспериментальным путями. Экспериментальное определение траектории движения рассматриваемых МТА производилось следующим образом. Трактор или машинно-тракторный агрегат устанавливался на участок поля, предназначенный для заезда; включалась регистрирующая аппаратура, и далее агрегат начинал движение сначала по прямой для набора необходимой скорости, затем водитель вел трактор по заранее размеченной траектории, согласно разработанной методике с использованием устройства для определения положения мобильной машины на местности (пат. №2171461). При заезде сигналы с одиннадцати датчиков, установленных на исследуемом агрегате и на вспомогательном транспортном средстве, поступали на модуль аналого–цифрового преобразования ZET–220 и далее на ноутбук, где регистрировались (рисунок 7). Образец осциллограммы, полученной при движении машинно-тракторного агрегата, представлен на рисунке 8.

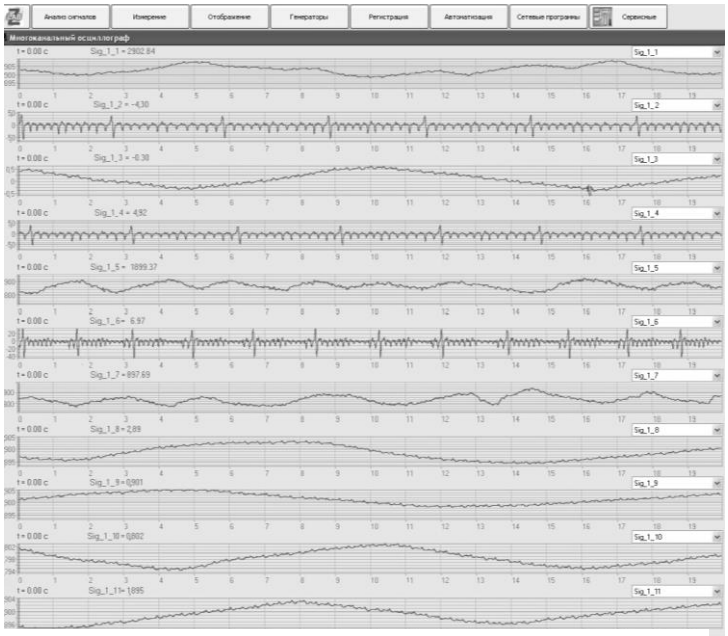

Рисунок 8. Образец осциллограммы движения МТА

Теоретические траекторные показатели движения исследуемого машинно-тракторного агрегата и трактора на холостом ходу определяли, решая систему дифференциальных уравнений (14). В качестве входного воздействия (изменение угла поворота управляемых колес трактора α, необходимое для движения по заданной траектории) принимали результат, полученный при экспериментальном исследовании процесса движения.

Четвертая глава посвящена анализу проведенных теоретических и экспериментальных исследований, выполнена проверка адекватности расчетных теоретических моделей, даны рекомендации по выбору наиболее рациональных параметров, обеспечивающих управляемое движение МТА с сохранением наиболее устойчивого положения орудия относительно трактора.

При движении МТА по криволинейной траектории в качестве количественной оценки управляемости использовался критерий, представляющий собой отношение средней скорости изменения курсового угла машинно-тракторного агрегата к средней скорости поворота его направляющих колес на зачетном участке гона:

$$\varepsilon_{УПР} = \frac{\overline{\omega}_{\Theta}}{\overline{\omega}_{\alpha}}. \qquad (16)$$

Средние значения скоростей определялись путем дифференцирования по времени функций, полученных при экспериментальных заездах по зачетному участку гона. Рассмотрев данные величины критерия управляемости в зависимости от кривизны траектории движения π_e, при различных значениях показателя переходного процесса λ, получим графики, на которых можно выделить границу управляемого движения агрегата, до условия отсутствия срыва грунта под управляемыми колесами (прямая 4 рисунок 9).

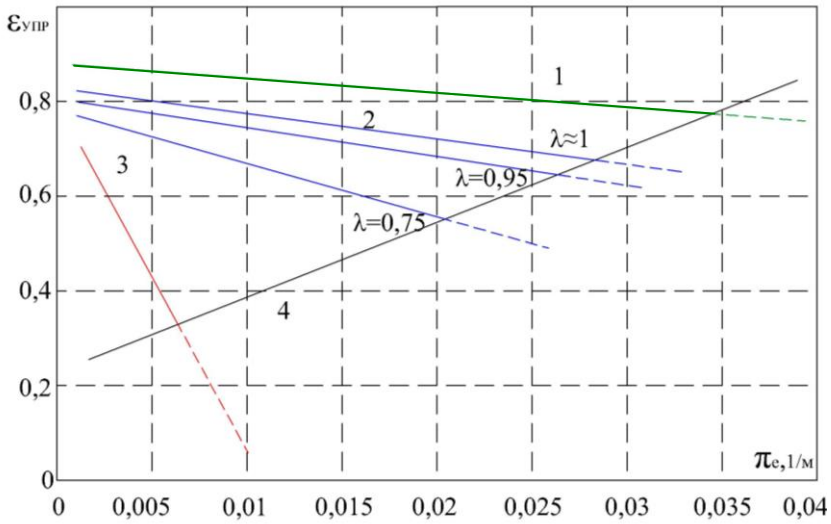

Рисунок 9. Зависимость управляемости от кривизны траектории движения: 1 – трактор на ХХ; 2 – трактор с упругое креплением орудия; 3 – трактор с жестким креплением орудия

При рассмотрении зависимости коэффициента управляемости $\varepsilon_{УПР}$ от типа переходного процесса λ, получим график 1 (рисунок 10), по которому можно выделить наиболее рациональный диапазон значений этого коэффициента, обеспечивающий управляемое движение при устойчивом положении орудия.

В случае, когда λ→1, практическая устойчивость падает всего на 3-5% (график 2 рисунок 10), в то время как управляемость увеличивается до значения, близкого к управляемости трактора на холостом ходу, - график 1. При дальнейшем увеличении показателя переходного процесса до значения λ≈2 практическая устойчивость орудия падает уже примерно на 30%, а управляемость незначительно (не более 5-6%) увеличивается (график 1 рисунок 10). К тому же дальнейший рост показателя переходного процесса может привести к полной потере управляемости. Это происходит вследствие того, что орудие начинает чрезмерно отклонятся, возникает необходимость в периодическом

подруливании, сопровождающаяся увеличением углов поворота управляемых колёс, для обеспечения нахождения рабочих органов в междурядьях, а это приводит к тому, что трактор начинает выезжать за пределы защитных зон, и может наступить «заламывание» орудия вследствие чрезмерного его отклонения и невозможности последующего возврата в нейтральное положение и, как следствие этого - невозможность дальнейшего движения МТА.

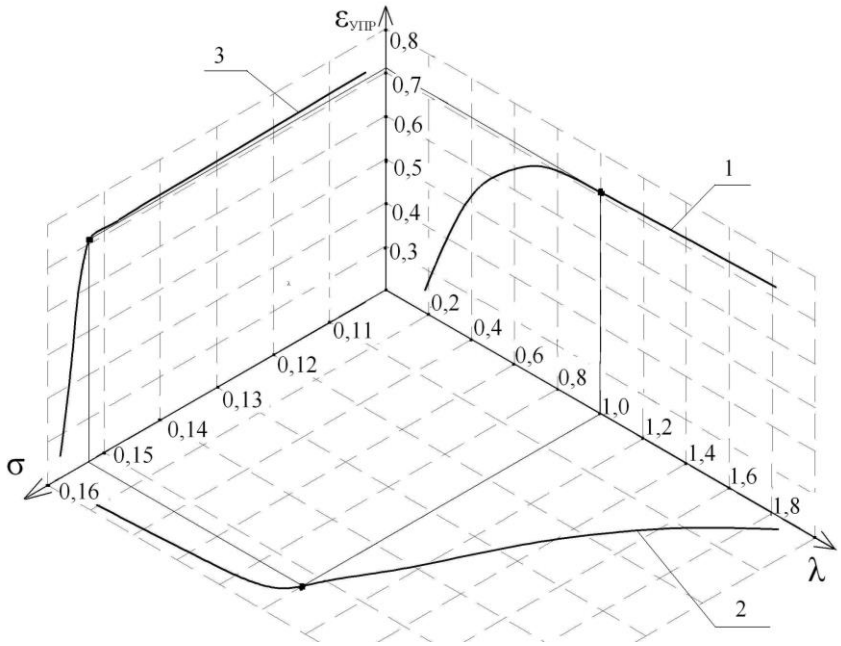

Рисунок 10. График зависимости между управляемостью и практической устойчивостью орудия

При выборе параметров, наиболее полно удовлетворяющих желательному процессу движения, построим график зависимости управляемости от показателя практической устойчивости орудия, исключив параметр, характеризующий тип затухающих колебаний, получив, таким образом, график, позволяющий выделить наиболее рациональные значения управляемости в зависимости от показателя практической устойчивости (график 3 рисунок 10).

Как видно из графика, увеличение λ позволяет повысить управляемость, которая достигает максимума при λ≈1, и продолжает незначительно увеличиваться при дальнейшем росте λ. Однако чрезмерный рост λ приводит не только к увеличению максимально возможного отклонения орудия, как следствие этого появлению вероятности выхода рабочих органов за пределы защитной зоны, но и к увеличению времени возврата орудия в нейтральное положение.

Исходя из вышесказанного, наиболее рациональным значением, при котором можно обеспечить приемлемую управляемость при одновременном сохранении устойчивости положения орудия, будет значение показателя переходного процесса, стремящееся к единице или ей. При этом минимальное значение данного показателя, при котором возможно управляемое движение агрегата, следует выбирать в зависимости от кривизны траектории движения (рисунок 9).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель движения агрегата в составе трактора и фронтально навешенного орудия. Определены связи между поворотом управляемых колес трактора и поворотом фронтально навешенного орудия.

2. Предложена и запатентована конструкция навесного устройства, обеспечивающая, с одной стороны, устойчивость движения фронтально навешенно-

го орудия, с другой, повышающая управляемость машинно-тракторного агрегата, основанная на возможности поворота орудия, с целью уменьшения действия сил, препятствующих криволинейному движению агрегата.

3. Проведены полевые испытания трактора с фронтально навешенным орудием, которые подтвердили адекватность полученных математических моделей. Сходимость результатов была в пределах 85-90%.

4. По результатам анализа теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что упругое соединение фронтального орудия с трактором позволяет, с одной стороны, обеспечить устойчивое положение орудия относительно трактора, с другой, уменьшить момент сопротивления повороту при движении МТА по криволинейной траектории на 35-38% по сравнению с агрегатом с жестко закрепленной фронтальной навеской. В случае прямолинейного движения устойчивость увеличивается на 20-25% по сравнению с движением трактора с жестко закрепленным орудием.

5. Управляемость агрегата с модернизированной системой навески составила $\varepsilon_{УПР3}$=0,72, что было достаточно для обеспечения управляемого движения во всем диапазоне экспериментальных заездов. Управляемость трактора на холостом ходу составила $\varepsilon_{УПР1}$=0,82. Управляемость агрегата с жестким креплением орудия составила $\varepsilon_{УПР3}$=0,28. Данный агрегат имел неудовлетворительную управляемость, но сам процесс движения мог быть возможен либо по прямому участку гона, либо при движении по синусоиде с периодом не менее 45-50 м. При этом углы поворота управляемых колес МТА находились в пределах ±7˚, а угол отклонения культиватора в пределах ±3˚, что было достаточно для обеспечения управляемого движения во всем диапазоне экспериментальных заездов.

6. Дисперсия отклонений рабочего органа от заданной траектории движения при упругом соединении (движение по синусоиде) составляла около 15,7см^2, при жестком соединении 38 см^2 и при этом 60% траектории движения рабочий орган находился за пределами защитных зон. В случае движения по прямой дисперсия отклонений рабочего органа от заданной траектории движения при упругом соединении - 9,7 см^2, при жестком - 6,2 см^2, в то же время дисперсия отклонения центра масс трактора, движущегося с жестко закрепленным орудием составила - 5,9 см^2, а с упругим креплением орудия - 3,8 см^2, и близка по своему значению к показателю трактора на холостом ходу - 2,9 см^2.

Список основных публикаций по теме диссертационной работы:

в изданиях по перечню ВАК

1. Площаднов, А.Н. Повышение управляемости машинно-тракторного агрегата с фронтальной навеской / А.Н. Площаднов, А.С. Зейгерман, И.В. Курсов, **П.Ю. Яковлев**, Э.С. Маршалов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2010. - №10. - С.27-30.

2. Гамалеев, П.П. Повышение устойчивости движения тракторов в составе агрегатов с фронтальным навешиванием / П.П. Гамалеев, А.С. Зейгерман, И.В. Курсов, Э.С. Маршалов, А.Н. Площаднов, **П.Ю. Яковлев** // Известия МГТУ «МАМИ». - 2011. - №1. - С. 26-31.

3. Площаднов, А.Н. Кинематика движения механизма фронтальной

навески в горизонтальной плоскости и её особенности / А.Н. Площаднов, **П.Ю. Яковлев**, А.С. Зейгерман, И.В. Курсов, Э.С. Маршалов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2012. - №4. - С.29-30.

4. **Яковлев, П.Ю.** Дифференциальное уравнение колебаний фронтально навешенного орудия в горизонтальной плоскости, соединенного с трактором посредством шарнирного четырехзвенника / **П.Ю. Яковлев**, А.Н. Площаднов // Вестник АГАУ. - 2013. - №6. - С.96-99.

в других изданиях

5. **Яковлев, П.Ю.** Анализ влияния частоты колебаний и коэффициента затухания колебаний от жесткости подрессоренных элементов фронтально-навесного устройства / **П.Ю. Яковлев**, Н.В. Попова // Материалы V всероссийской научно-технической конференции «Проблемы социального и научно-технического развития в современном мире» / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск. - 2003. - С.139-144.

6. Площаднов, А.Н., Проблемы создания тягово-транспортных машин/ А.Н. Площаднов, **П.Ю. Яковлев**, А.С. Зейгерман // Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции «Современные тенденции развития автомобилестроения в России». - Тольятти: ТГУ. - 2005. - С.8-10.

7. Зейгерман, А.С. Повышение управляемости машинно-тракторного агрегата в междурядьях / А.С. Зейгерман, **П.Ю. Яковлев** // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Проблемы социального и научно-технического развития в современном мире» / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск. - 2007. - С.70-71.

8. Зейгерман, А.С. Решение проблемы управляемости машинно-тракторного агрегата с фронтальной навеской / А.С. Зейгерман, А.Н. Площаднов, **П.Ю. Яковлев**, Э.С. Маршалов // Труды Рубцовского индустриального института: Выпуск 20: Технические науки / Под ред. А.А. Апполонова / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск. - 2009. – С. 82-87.

9. **Яковлев, П.Ю.** Повышение устойчивости движения машинно-тракторного агрегата с фронтальной навеской / **П.Ю. Яковлев**, А.Н. Площаднов, А.С. Зейгерман, И.В. Курсов // Труды Рубцовского индустриального института: Выпуск 20: Технические науки / Под ред. А.А. Апполонова / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск. - 2009. – С. 170-174.

10. Гамалеев, П.П., Улучшение управляемости тракторов при работе с фронтально навесными орудиями с целью повышения качества обработки почвы / П.П. Гамалеев, А.С. Зейгерман, И.В. Курсов, Э.С. Маршалов, А.Н. Площаднов, **П.Ю. Яковлев** // Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров». - МГТУ «МАМИ». - 2010. – С. 375-379.

11. **Яковлев, П.Ю.** Автоматическая система управления жёсткостью фронтальной навески / **П.Ю. Яковлев** // Материалы XIII всероссийской научно-технической конференции «Проблемы социального и научно-технического развития в современном мире» / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск. - 2011. - С.153-154.

12. **Яковлев, П.Ю.** Кинематические соотношения механизмов фронтальной навеской / **П.Ю. Яковлев** // Современная техника и технологии: проблемы, состояния и перспективы I всерос. научно-техн. конф. / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск. - 2011. - С. 517-524.

13. **Яковлев, П.Ю.** Экологические аспекты использования машинно-тракторных агрегатов / **П.Ю. Яковлев**, А.Н. Площаднов // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: Сборник статей. - Барнаул АлтГТУ. - 2011-С.114-116.

14. **Яковлев, П.Ю.** Выявление бифуркационного поведения механизма фронтальной навески / **П.Ю. Яковлев** // Материалы XIV всероссийской научно-технической конференции «Проблемы социального и научно-технического развития в современном мире» / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск. - 2012. – С.139-141.

15. **Яковлев, П.Ю.** Ресурсосберегающие технологии при использовании комбинированных машинно-тракторных агрегатов / **П.Ю. Яковлев** // Труды Рубц. ндустр. ин-та: Вып. 21: / Под ред. А.А. Апполонова / Рубц. ндустр. ин-т.- Рубцовск. - 2013. – С. 109-111.

16. **Яковлев, П.Ю.** Дифференциальное уравнение колебаний фронтально - и задненавесного орудий в горизонтальной плоскости / **П.Ю. Яковлев,** А.Н. Площаднов **//** Труды Рубцовского индустриального института: Выпуск 21: Технические науки / Под ред. А.А. Апполонова / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск. - 2013. – С.112-117.

17. **Яковлев, П.Ю**. Эквивалентная кинематическая схема четырехзвенного механизма. Условие устойчивости. Уравнение колебаний / **П.Ю. Яковлев**, А.Н. Площаднов, А.С. Демидов // Труды Рубц. ндустр. ин-та: Вып. 21: / Под ред. А.А. Апполонова / Рубц. ндустр. ин-т.- Рубцовск, 2013. – С. 117-123.

патенты

18. Пат. 2296447 Российская Федерация, A01B 59/041, 59/048 Сельскохозяйственный агрегат. / А.Н. Площаднов, И.В. Курсов, Э.С. Маршалов, **Яковлев П.Ю.**, А.С. Зейгерман.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО Алтайский гос. техн. ун-т. им. И.И. Ползунова. - №2005122980/12 – заявл. 19.07.2005; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 10. - 4 с.: ил.

19. Пат. 2426088 Российская Федерация, G01M 17/00 Устройство для определения массово-геометрических характеристик тягово-транспортных средств. / А.Н. Площаднов, А.С. Зейгерман, **Яковлев П.Ю.,** И.В. Курсов, Э.С. Маршалов.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО Алтайский гос. техн. ун-т. им. И.И. Ползунова. - №2010106511/11 – заявл. 24.02.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22. - 5 с.: ил.

20. Пат. № 2427995 Российская Федерация, A01B 59/06 Фронтальная навеска трактора. / А.Н. Площаднов, **Яковлев П.Ю.**, А.С. Зейгерман, Э.С. Маршалов, И.В. Курсов, Е.И. Бутаков, Т.А. Убогова.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО Алтайский гос. техн. ун-т. им. И.И. Ползунова. - №2010106512/21– заявл. 24.02.2010; опубл. 10.09.2011, Бюл. № 25- 4 с.: ил.

Подписано к печати 27.03.2014 г.
Тираж 120 экз. Заказ № 141253.
Объем 1,12 п.л. Рег.№106.

Отпечатано в типографии ООО фирма «Выбор».
658213, Рубцовск, пр. Ленина 41.
тел. 8(38557)99148