

На правах рукописи

Куриленко Алексей Викторович

**РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ
СКОРОСТИ ТРАКТОРА ВИДЕОРЕГИСТРАЦИЕЙ ОПОРНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и
оборудование для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева»

Научный руководитель: **Девянин Сергей Николаевич,**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО
«Российский государственный аграрный университет
- МСХА имени К.А. Тимирязева»

**Официальные
оппоненты**

Сидоров Владимир Николаевич,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры МКБ «Колесные машины и прикладная
механика» Калужского филиала ФГАОУ ВО
«Московский государственный университет имени
Н. Э. Баумана»
Грибов Иван Васильевич,
кандидат технических наук, главный специалист
Центра сельскохозяйственного машиностроения
ФГУП «НАМИ»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет»

Защита состоится 24.12.2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел./факс: 8(499)976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49

С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___»_____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.03, _____ Пуляев Н.Н.
к.т.н., доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Внедрение систем видеорегистрации и обработки данных открывает новые возможности для автоматизации и оптимизации сельскохозяйственных процессов. Разработка методов определения скорости на основе этих технологий способствует развитию умной техники и повышению её эффективности.

Точное определение скорости также помогает снизить затраты на топливо и обслуживание техники, а также оптимизировать использование ресурсов. Это особенно актуально в условиях экономической нестабильности и роста цен на энергоносители. А методы определения скорости на основе видеорегистрации могут быть интегрированы с другими системами управления и мониторинга, что позволяет создавать комплексные решения для оптимизации работы техники.

Внедрение таких методов способствует развитию технологий автоматизации и повышению эффективности использования тягово-транспортных средств (ТТС) в сельском хозяйстве.

Степень разработанности темы исследования. Научные основы исследований действительной скорости сельскохозяйственных машин и машинных агрегатов сформированы на базе работ В.П. Горячкина, Е.Д. Львова, Д.К. Карельских, В.Н. Болтинского, О.Н. Дидманидзе, В.И. Черноиванова, Г.М. Кутькова, С.Н. Девянина, А.Г. Арженовского, А.Г. Левшина, Б.С. Свирщевского и др., а также зарубежных ученых – Adams B.T., Brixius W.W., Cleveland W.S., Hast A., Lancas K.P., Wong J.Y., и других авторов. Работы этих авторов явились основой для проведения данного исследования.

Цель работы: заключается в разработке метода определения в режиме реального времени действительной скорости движения для оценки буксования ведущих колеса трактора на тяговых работах.

Задачи исследования:

1. Определить оптимальное буксование на различных почвенных фонах.
2. Теоретически обосновать использование видеорегистрации для определения действительной скорости трактора.
3. Экспериментально проверить возможность использования видеорегистрации на различных сельскохозяйственных фонах опорной поверхности.
4. Провести экспериментальную проверку разработанного способа видеорегистрации для определения действительной скорости.
5. Разработать рекомендации по использованию разработанного способа определения действительной скорости движения для оценки буксования.

Научная новизна:

1. Предложена оригинальная зависимость взаимосвязи относительной касательной силы колеса с величиной буксования.
2. Разработан метод определения действительной скорости трактора на основе видеорегистрации опорной поверхности.

Теоретическая значимость Разработанный метод позволяет оперативно определять действительную скорость трактора для оценки буксования движителей и выполнять оперативное управление движением, что позволяет повысить эффективность использования тягово-транспортных средств за счет улучшения их эксплуатационных свойств, в частности снижения потерь при буксовании движителей трактора.

Практическая ценность результатов работы. Разработанный метод позволяет оперативно определять действительную скорость трактора для оценки буксования движителей и выполнять оперативное управление движением, что позволяет повысить эффективность использования тягово-транспортных средств за счет улучшения их эксплуатационных свойств, в частности снижения потерь при буксовании движителей трактора.

Представленный в диссертации метод определения действительной скорости разработан для тягово-транспортных средств различного назначения.

Объектом исследования является процесс измерения действительной скорости движения трактора.

Предмет исследования видеорегистрация опорной поверхности для определения относительной скорости движения.

Методология и методы исследования. При выполнении научного исследования использованы методы аналитического исследования выполненных ранее работ, математического анализа физических процессов, экспериментальных исследований на модельной установке и реальном объекте, статистической обработки полученных результатов с использованием современных вычислительных средств.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость взаимосвязи относительной касательной силы колеса с величиной буксования.
2. Метод определения действительной скорости трактора на основе видеорегистрации опорной поверхности.
3. Результаты экспериментальных исследований.

Достоверность результатов исследования подтверждается сходимостью теоретических показателей и экспериментальных результатов, полученных в полевых условиях во время эксплуатации колесных тракторов.

Результаты диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на тематических научных конференциях: научный семинар «Чтения академика В.Н. Болтинского» (Москва, 17-18 января 2023г), Наука без границ и языковых барьеров (Орёл, 27-28 апреля 2023 г.), Научный семинар «Чтения академика В.Н. Болтинского» (Москва, 17-18 января 2025г), международных научных и научно-практических конференциях: Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 150-летию со дня рождения Миловых Александра Яковлевича (Москва, 3-5 июня 2024г), Научно-практическая конференция, посвящённая 90-летию Шарова М.Н., в рамках постоянно действующего семинара «Чтения академика В.Н. Болтинского» (Москва 23-24 октября 2024г.), Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 160-летию Тимирязевской академии (Москва, 2-4 июня 2025г.), что дает право сделать обоснованный вывод о достаточной полноте отражения результатов исследования в научных публикациях и высокой степени апробации.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 4 научных статьи, в том числе – 2 в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и рекомендаций, библиографического списка из 124 наименований, в том числе 42 на иностранном языке, количество таблиц 21, рисунков 69 и приложений 2. Объем диссертации – 151 страница машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится общая характеристика работы, представлена актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи научного исследования, отражена научная новизна работы, а также достоверность результатов и их практическая значимость.

В первой главе проведён анализ научных исследований процесса буксования, для определения которого требуется измерение действительной скорости. Анализ известных способов измерений скорости трактора показал, что заслуживает внимания способ видеорегистрации, который может обеспечить невысокую погрешность, достаточное быстродействие для управления трактором, доступное оборудование и хорошие перспективы развития.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе сделан теоретический анализ влияния буксования на эффективность работы ведущего колеса, рассмотрены тяговые качества ведущего колеса и определены основные факторы влияющие на КПД ведущего

колеса трактора, одним из которых является его буксование при обеспечении необходимой тяговой силы.

Эффективность работы ведущего колеса оценивалась по его коэффициенту полезного действия η_k , значение которого определялось по известному выражению как отношение созданной им тяговой мощности $N_{кр}$ (крюковой) к подведенной к нему мощности N_k из трансмиссии:

$$\eta_k = \frac{N_{кр}}{N_k} \quad (1)$$

Рассматривая зависимость подведенной к колесу мощности N_k как произведение ведущего момента на колесе M_k и его угловой частоты вращения ω_k , а ведущего момента M_k как произведение касательной силы P_k и динамического радиуса колеса r_d получаем зависимость:

$$N_k = M_k \cdot \omega_k = P_k \cdot r_d \cdot \omega_k \quad (2)$$

Рассматривая зависимость крюковой мощности $N_{кр}$ как произведение крюковой силы $P_{кр}$ и действительной скорости v_d , а действительную скорость v_d через ее взаимосвязь с теоретической скоростью v_m и коэффициентом буксования δ в виде $v_d = v_m \cdot (1 - \delta)$, с учетом $v_m = \omega_k \cdot r_k$, получаем зависимость:

$$N_{кр} = P_{кр} \cdot v_d = P_{кр} \cdot r_k \cdot \omega_k \cdot (1 - \delta) \quad (3)$$

Принимая, что значения динамического r_d и кинематического r_k радиусов колеса близки между собой ($r_k/r_d \approx 1$), с учетом взаимосвязи касательной P_k и крюковой $P_{кр}$ сил и силы сопротивления качению колеса P_f , выражение для КПД ведущего колеса может быть представлено после преобразования в виде:

$$\eta_k \approx \left(1 - \frac{P_f}{P_k}\right) \cdot (1 - \delta) \quad (4)$$

Как следует из полученного выражения, основными факторами, влияющими на КПД ведущего колеса, являются:

- сила сопротивление качению колеса;
- касательная сила ведущего колеса;
- буксование.

Рассматривая относительную силу сопротивления качению f (известную как коэффициент сопротивления качению) в виде отношения силы сопротивления качению P_f к нормальной нагрузке на колесо G_k , и относительную касательную силу φ в виде отношения касательной силы P_k к нормальной нагрузке на колесо G_k , получим выражение для КПД ведущего колеса в виде:

$$\eta_k = \left(1 - \frac{f}{\varphi}\right) \cdot (1 - \delta) \quad (5)$$

Полученное выражение для КПД η_k еще достаточно сложно для анализа влияния буксования колеса на его КПД, т.к. в выражении содержится коэффициент φ , который зависит от касательной силы P_k непосредственно влияющей на величину буксования.

Для исключения влияния касательной силы ведущего колеса предложена зависимость относительной касательной силы $\varphi = P_k/G_k$ от буксования δ :

$$\varphi = \varphi_{\max} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\delta}{k}\right)\right), \quad (6)$$

где: $\varphi_{\max}$ – коэффициент сцепления колеса с опорной поверхностью, определяющий предельное значение касательной силы на данном виде опорной поверхности;

k – коэффициент податливости системы «ведущее колесо–опорная поверхность» (величина обратная жесткости системы).

Значение коэффициента буксования δ по данной зависимости имеет следующий вид:

$$\delta = -k \cdot \ln\left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{\max}}\right) \quad (7)$$

Если величина коэффициента сцепления $\varphi_{\max}$ приводится в справочной литературе для различных видов опорных поверхностей, то значение коэффициента податливости k для различных опорных поверхностей потребовало проведения специальных исследований. В качестве исходных данных были использованы известные результаты экспериментальных исследований и эмпирические зависимости для коэффициента буксования различных ученых: Ю.В. Гинзбурга, Г. Г. Колобова и А. П. Парфенова, Г. М. Кутькова, В. А. Савочкина.

Результаты проведенного исследования позволили определить значения коэффициента податливости k для различных почвенных фонов. Сделанная оценка изменения коэффициента буксования δ от относительной касательной силы φ для различных почвенных фонов, задаваемых коэффициентами $\varphi_{\max}$ и f , приведенными в таблице 1, показаны на рисунке 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов для разных почвенных фонов

Опорная поверхность	Поле, подготовленное под посев	Стерня	Целина, плотная залежь	Асфальт, бетон
$\varphi_{\max}$	0,57	0,64	0,69	0,8
f	0,17	0,1	0,06	0,018
k	0,11	0,13	0,12	0,065
№ кривой на рис. 1	1	2	3	4

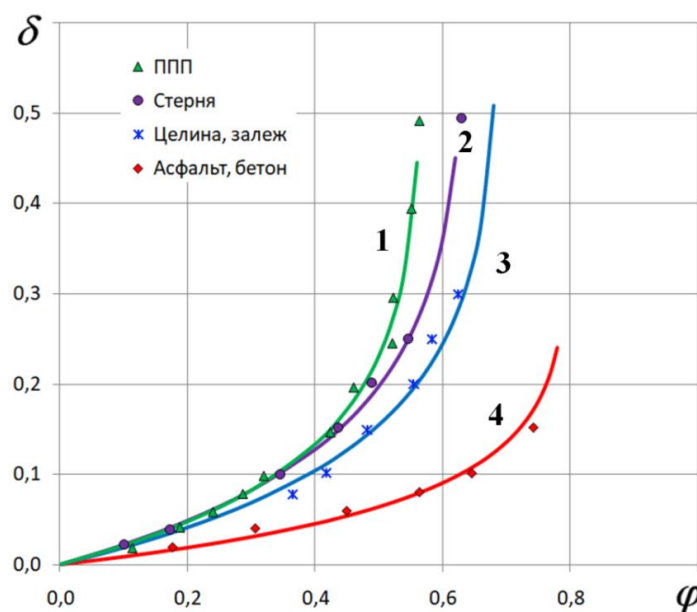


Рисунок 1 – Изменение коэффициента буксования для разных почвенных фонов по данным экспериментов (маркеры) и по уравнению (7)

Приведенные данные показывают хорошее описание величины буксования от относительной касательной силы и позволяют использовать полученную зависимость для аналитических исследований.

Таким образом, получены численные значения сочетания коэффициентов сцепления φ_{max} и податливости k для определения значений коэффициента буксования по предлагаемой зависимости на различных почвенных фонах:

- для поля, подготовленного под посев $\varphi_{max} = 0,57$ и $k = 0,11$;
- для стерни $\varphi_{max} = 0,64$ и $k = 0,13$;
- для целины или плотной залежи $\varphi_{max} = 0,69$ и $k = 0,12$;
- для асфальта или бетона $\varphi_{max} = 0,8$ и $k = 0,065$.

Полученное уравнение (7) для расчета коэффициента буксования имеет следующие преимущества для использования при анализе тяговых характеристик трактора или ведущего колеса:

- 1) формула отличается простотой и наличием трех влияющих факторов, значения двух из которых можно найти в справочной литературе;
- 2) создаваемая касательная сила ведущего колеса задается в виде относительной (безразмерной) величины φ ;
- 3) сцепные свойства колеса с опорной поверхностью задаются широко используемым коэффициентом сцепления φ_{max} , значения которого можно найти в справочной литературе для различных почвенных фонов;
- 4) коэффициент податливости k определяется степенью деформации в системе «колесо – опорная поверхность» в ответ на силовое воздействие, приложенное к системе и определены его численные значения для различных почвенных фонов.

Определен диапазон изменения введенного коэффициента податливости k , значения которого для условий работы сельскохозяйственных тракторов составили $k = 0,03 \dots 0,15$.

На основании процессов, происходящих в пятне контакта ведущего колеса с опорной поверхностью, получено выражение взаимосвязи касательной силы колеса с буксованием. Выражение включает безразмерные величины и учитывает касательную силу, сцепление колеса с опорной поверхностью, буксование колеса и коэффициент податливости (эмпирический коэффициент). Полученное выражение проверено на результатах испытаний тракторов 4к4 и результаты исследований показали возможность его использования для различных видов опорной поверхности.

На рисунке 2,а показано влияние коэффициента сцепления φ_{max} на характеристику буксования при значении коэффициента податливости $k = 0,13$, а на рисунке 2,б показано влияние коэффициента податливости k на характеристику буксования при значении коэффициента сцепления $\varphi_{max} = 0,6$.

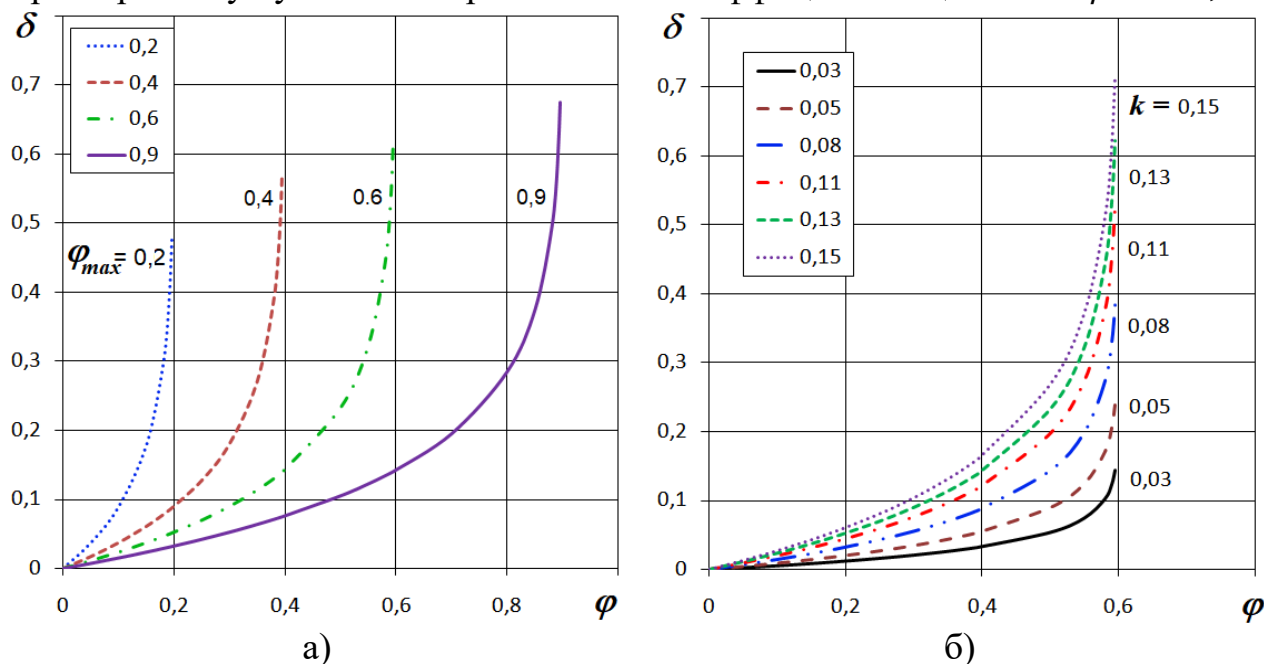


Рисунок 2 – Влияние коэффициентов уравнения (7) на характер изменения коэффициента буксования δ от φ : а) – при изменении φ_{max} ($k = 0,13$); б) – при изменении k ($\varphi_{max} = 0,6$).

Анализ результатов исследований показывает, что коэффициент податливости k учитывает возникающие деформации в системе «ведущее колесо – опорная поверхность» при приложении касательной силы, которая включает оценку свойств опорной поверхности, эластичной шины и условия их взаимодействия.

Используя полученное уравнение (6), связывающее касательную силу тяги с коэффициентами буксования, сцепления и податливости и зависимость (5) для

КПД ведущего колеса, после подстановки получаем следующий вид выражения для КПД, которое можно использовать для анализа влияния буксования на КПД:

$$\eta_k = \left(1 - \frac{f}{\varphi_{max} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\delta}{k}\right) \right) \right) \cdot (1 - \delta) \quad (8)$$

Для наглядного отображения влияния буксования δ ведущего колеса на его КПД η_k были проведены расчетные исследования для разных типов опорной поверхности, характеристики которых приведены в таблице 1. Результаты этих расчетов показаны на рисунке 3.

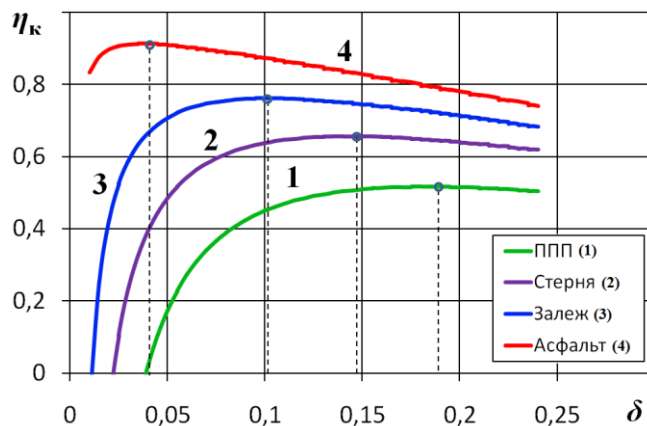


Рисунок 3 – Влияние коэффициента буксования δ на КПД ведущего колеса η_k на разных опорных поверхностях: 1 – поле, подготовленное под посев; 2 – стерня; 3 – целина, плотная залежь; 4 – асфальт, бетон.

Полученные зависимости показывают, что буксование, при котором достигается максимальный КПД ведущего колеса, зависит от свойств опорной поверхности, с которой ведущее колесо взаимодействует.

Анализ влияния буксования на КПД ведущего колеса показал, что максимальный КПД достигается при определенном буксовании (оптимальное), которое зависит от свойств опорной поверхности, с которой взаимодействует ведущее колесо. Значения оптимального буксования δ_m для исследованных поверхностей имеют следующие значения:

- для поля, подготовленного под посев $\delta_m \approx 0,185$;
- для стерни $\delta_m \approx 0,145$;
- для целины или плотной залежи $\delta_m \approx 0,1$;
- для асфальта или бетона $\delta_m \approx 0,04$.

Энергетические потери на деформацию опорной поверхности в пятне контакта связывают с коэффициентом сопротивления качению колеса f . Количественное влияние его на максимальный КПД ведущего колеса η_{km} и значение оптимального буксования δ_m , при котором оно получено для

рассматриваемых опорных поверхностей, показано на рисунке 4 в виде зависимости от коэффициента сопротивления качению f .

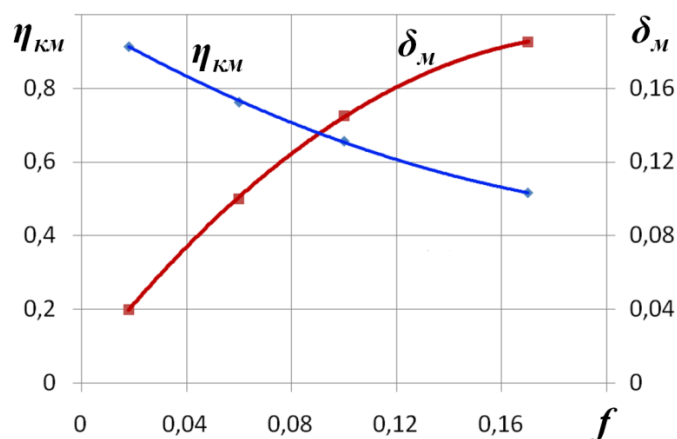


Рисунок 4 – Изменение максимальных значений КПД ведущего колеса $\eta_{км}$ и оптимального значения коэффициента буксования δ_m в зависимости от коэффициента сопротивления качению для рассмотренных опорных поверхностей.

Величина оптимального значения коэффициента буксования изменяется на разных фонах опорной поверхности от 0,04 до 0,19. Для обеспечения эффективной работы сельскохозяйственных тракторов на различных фонах опорной поверхности необходимо поддерживать величину буксования в оптимальной зоне, что требует его оперативного контроля в процессе работы.

В третьей главе описаны созданные установки для экспериментальной проверки возможности определения действительной скорости по видеорегистрации опорной поверхности, т.к. результатов таких исследований найти не удалось. Поэтому для оценки возможности измерения действительной скорости с подвижного объекта по данным видеорегистрации потребовалась экспериментальная проверка. Для этой цели были подготовлены экспериментальные установки, на которых проведены сначала исследования в лабораторных условиях, а затем в полевых на тракторе.

Лабораторная установка была оснащена «эталонным» измерителем действительной скорости ИСД 3.1 и видеорегистратором опорной поверхности на базе камеры Sony IMX363, аналогово-цифровым преобразователем, компьютером для сохранения записанного сигнала и АКБ для питания измерительной системы. Установка приводилась в движение вручную. Принципиальная схема лабораторной установки с установленным на ней оборудованием приведена на рисунке 5.

Проведение исследований на установке и предварительная обработка полученных результатов осуществлялось в соответствии с разработанной методикой, которая включала процесс калибровки измерительной системы,

последовательность операций по запуску системы измерений и проведению измерений, подготовке данных к предварительной обработке и последовательность проведения предварительной обработки данных.

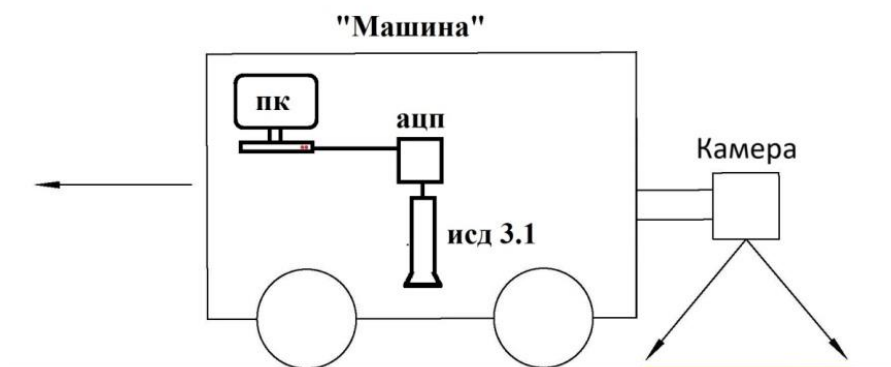


Рисунок 5 – Принципиальная схема лабораторной установки

Установка для проведения экспериментальных исследований в полевых условиях включала два трактора МТЗ-82, первый из которых являлся трактором-тягачом, а второй – трактором-нагрузкой. Общий вид тракторов в сцепке при проведении испытаний показан на рисунке 6.



Рисунок 6 – Трактор-тягач МТЗ – 82 в сцепке через транспортный фал с трактором-нагрузкой в процессе полевых исследований

Все измерительное оборудование располагалось на тракторе-тягаче. Трактор-тягач МТЗ-82 для проведения полевых испытаний был оснащен необходимым измерительным оборудованием для измерения теоретической и действительной скорости, тягового усилия на сцепке, системой регистрации, сбора, предварительной обработки и хранения результатов измерений. Внешний вид трактора-тягача и установленного измерительного оборудования показан на рисунке 7. Принципиальная схема расположения и подключения оборудования на тракторе-тягаче МТЗ-82 приведена на рисунке 8.



Рисунок 7 – Трактор МТЗ – 82 с установленным оборудованием

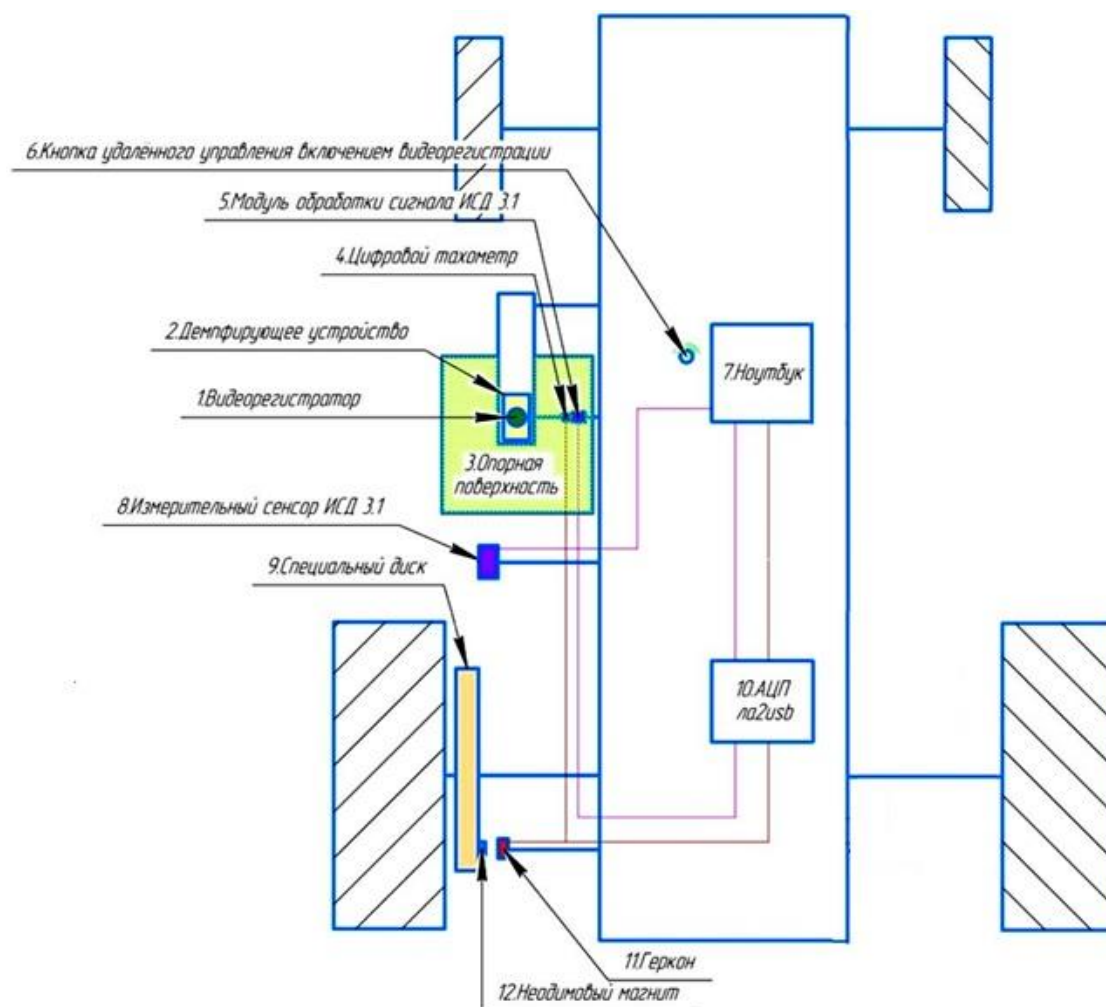


Рисунок 8 – Принципиальная схема расположения и подключения оборудования на тракторе-тягаче МТЗ - 82

В отличие от лабораторной установки, видеорегистратор монтировался к трактору-тягачу через демпфирующее устройство, конструктивные параметры

которого были оптимизированы по виброускорениям видеорегистратора до начала полевых испытаний.

Проведение исследований в полевых условиях и предварительная обработка полученных результатов осуществлялось в соответствии с разработанной методикой, которая включала процесс калибровки измерительной системы, последовательность операций по запуску системы измерений и проведению измерений, подготовке данных к предварительной обработке и последовательность проведения предварительной обработки данных.

В четвертой главе приводятся методика обработки результатов видеорегистрации для определения скорости движения и результаты экспериментальных исследований, полученные в процессе лабораторных и полевых испытаний.

Принцип определения действительной скорости заключается в съёмке на видеокамеру опорной поверхности, по которой объект перемещается, камера установлена на объекте перемещения.

На видео во время просмотра наблюдается опорная поверхность, которая никогда не является идеально монотонной, на ней могут быть неоднородности различного вида: пятна, камни, листва разные вкрапления в асфальте и т.д. Фиксируя и находя положения этих неоднородностей на последующих кадрах видео можно узнать их перемещение по кадру. Обработка видеок кадров для поиска выделенного фрагмента выполнялась с помощью программы Filmora, находящейся в свободном доступе. Единицей времени выступает величина обратная частоте кадров, а расстоянием пиксели на кадрах видеоряда.

Для определения скорости по видеорегистрации необходимо задать положение зафиксированного фрагмента на первом (i -ом) кадре a_i , определить положение фрагмента на следующем кадре a_{i+1} (рисунок 9), время регистрации первого кадра t_1 и время регистрации второго кадра t_2 , тогда скорость движения может быть определена по формуле приведённой ниже.

$$v' = \frac{a_i - a_{i+1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta a}{\Delta t} \left(\frac{\text{пиксель}}{\text{секунда}} \right) \quad (9)$$

Для нахождения скорости в метрах в секунду необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$v = \frac{a_i k_a - a_{i+1} k_a}{\Delta t} = \frac{(a_2 - a_1) k_a}{\Delta t} \left(\frac{\text{метр}}{\text{секунда}} \right) \quad (10)$$

где k_a – масштабный коэффициент, (м/пиксель).

Для того что бы узнать расстояние, на которое перемещается движущийся объект необходимо знать разрешение кадра с которой снимает видеокамера. Это количество пикселей по горизонтали a_p и вертикали кадра b_p , которые формируют изображение. Для нахождения размера пикселя на фрагменте кадра в метрах необходимо знать значение масштабного коэффициента k_a .

Величина коэффициента k_a может быть найдена по выражению:

$$k_a = \frac{l_{on}}{a_p}, \quad (11)$$

где l_{on} — это длина отрезка опорной поверхности уместяющегося по длине кадра при регистрации [м] (рисунок 4.5);

a_p — количество пикселей на кадре по длине отображаемого на кадре отрезка длиной l_{on} .

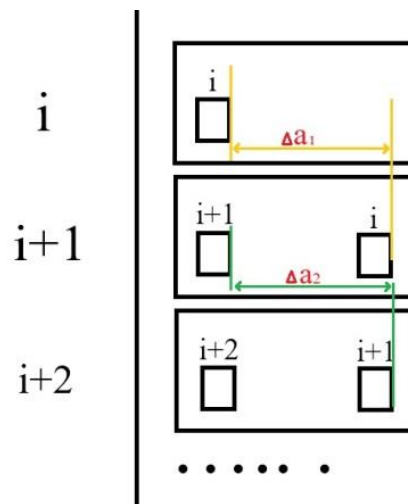


Рисунок 9 – Нахождение смещения фрагмента Δa на кадрах видео регистратора

Для того что бы найти время, за которое происходит смена кадров на видео ($\Delta t = t_{i+1} - t_i$) можно использовать значение заданной при съемке частоты кадров f (количество сделанных фотографий в секунду), и искомое время составит, (с):

$$t_{\text{кадра}} = \frac{1}{f} \quad (12)$$

Данные позволяют рассчитать скорость движения v для каждой пары кадров видеорегистрации по выделенным фрагментам и в дальнейшем определить скорость перемещения фрагмента по кадру и с использованием значения масштабного коэффициента k_a действительную скорость мобильного средства по выражению:

$$v = k_a \cdot v' = k_a \cdot \frac{\Delta a_i}{t_{\text{кадра}}}, \quad (13)$$

где: v' — относительная скорость фрагмента на кадре, пиксел/с;

Δa_i — смещение фрагмента на i -ом кадре, пикселей.

Таким образом, используя разработанную методику обработки видеоматериала можно определить скорость движения опорной поверхности относительно видеорегистратора, т.е. действительную скорость трактора относительно опорной поверхности.

Испытания первого этапа в лабораторных условиях включали проверку возможности использования предлагаемого способа измерения действительной скорости по видеорегистрации на различных фонах опорной поверхности.

Исследования проводились на следующих фонах:

- асфальт, мокрый асфальт, брусчатка;
- стерня, поле под посев, гравийная дорога;
- снег без посторонних следов, снег с оттиском протектора колеса, накатанная снежная дорога.

Образцы исследуемых фонов приведены на рисунке 8. Практически на всех исследованных фонах удавалось определить действительную скорость движения установки. Исключение составил фон, покрытый слоем воды, на котором не удавалось определить выделенный фрагмент на следующем отснятом кадре. Таким образом, была проведена экспериментальная проверка в лабораторных условиях, которая показала возможность использования разработанного способа измерения действительной скорости по видеорегистрации почти на всех фонах опорной поверхности, используемой в сельскохозяйственном производстве.

Проведенные экспериментальные исследования в лабораторных условиях на различных почвенных фонах показали присутствие больших разбросов необходимости монтажа видеорегистратора на машине через демпфирующее устройство для снижения колебаний, передаваемых вибраций от остова машины.

Исследования эффективности использования демпфирующего устройства показали необходимость подбора массы утяжелителя демпфера. Применение утяжелителя массой 435 гр. для видеорегистратора позволило снизить передаваемые на него виброускорения с 225 до 78 см/с² или в 2,9 раза.

На втором этапе исследований проведены испытания разработанного способа при работе трактора-тягача МТЗ-82 в полевых условиях на разных почвенных фонах без нагрузки и с нагрузкой. В качестве нагрузки использован второй трактор-нагрузка МТЗ-82. Изменение нагрузки в процессе испытаний обеспечивалось подтормаживанием второго трактора, что позволяло изменять величину буксования от 0 до 100%.

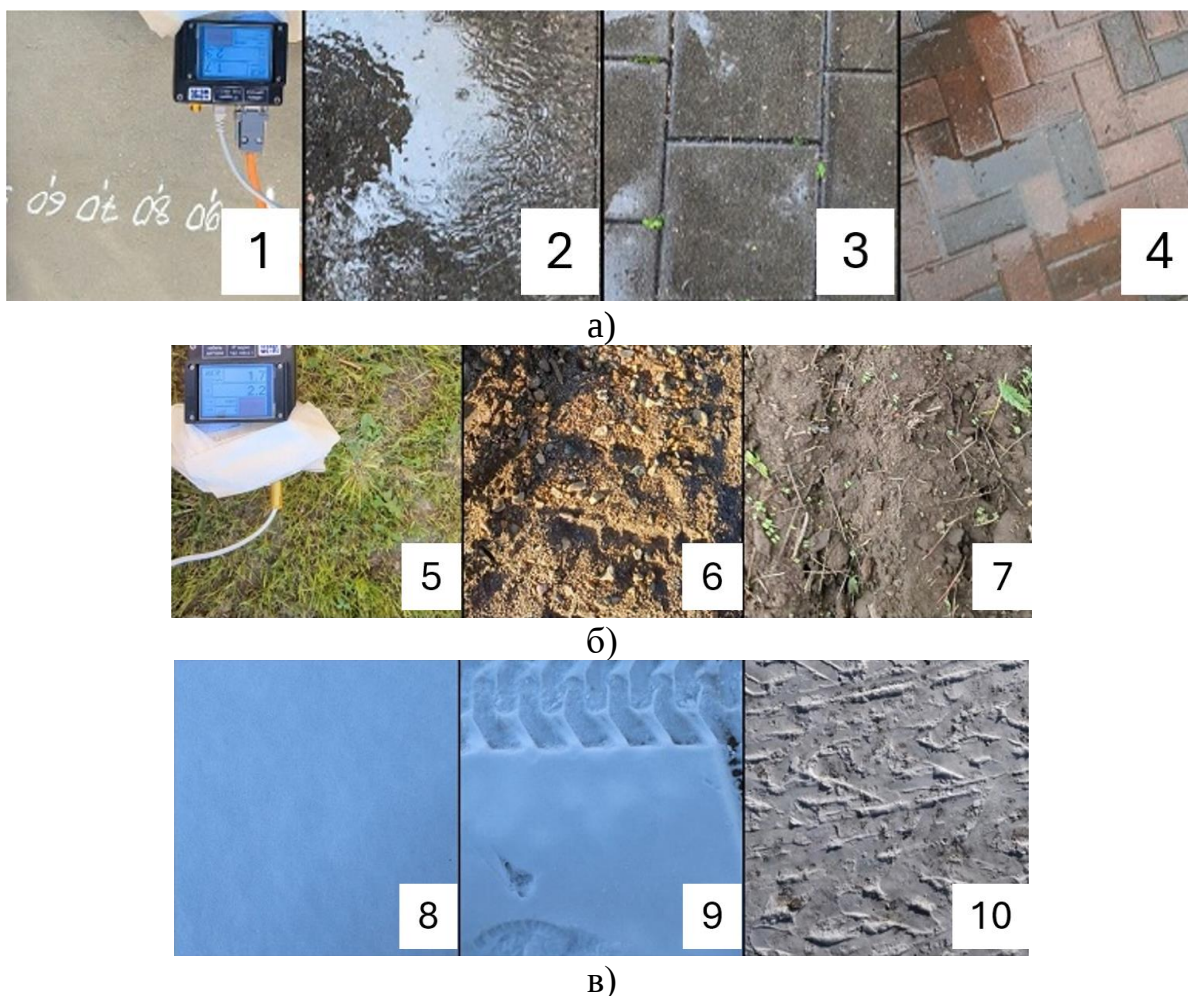


Рисунок 8 – Примеры исследованных опорных поверхностей: а – асфальт (1 – асфальт; 2 – асфальт, покрытый водой; 3 – брусчатка тип 1; 4 – брусчатка тип 2); б – почва (5 – стерня; 6 – гравийная дорога; 7 – поле под посев); в – снежный покров (8 – снег без посторонних следов; 9 – снег со следом протектора; 10 – накатанный снежный покров);

Для проверки применимости определения действительной скорости трактора V_0 во время технологических операций была проведена серия экспериментов, где трактор МТЗ – 82 на почвенном фоне – стерня тянул за собой трактор-нагрузку, который по команде механизатора управляющего трактором-нагрузкой начинал тормозить. В процессе торможения возникали переменные усилия нагрузки, что позволяло оценить адекватность отображения измеренной действительной скорости и процесса буксования непосредственно в процессе движения тракторов.

На рисунке 11,а показан пример получаемого результата измерения скорости движения с помощью видеорегистратора трактора-тягача МТЗ 82 (кривая 1) в сцепке с трактором-нагрузкой и результаты измерений с помощью прибора ИСД 3.1 (кривая 2) при движении на одном из участков по стерне. На рисунке 11,б для этого же времени испытаний приведены результаты измерений

теоретической (кривая 1) и действительной (кривая 2) скоростей трактора-тягача и измеренной силы тяги на крюке (кривая 3).

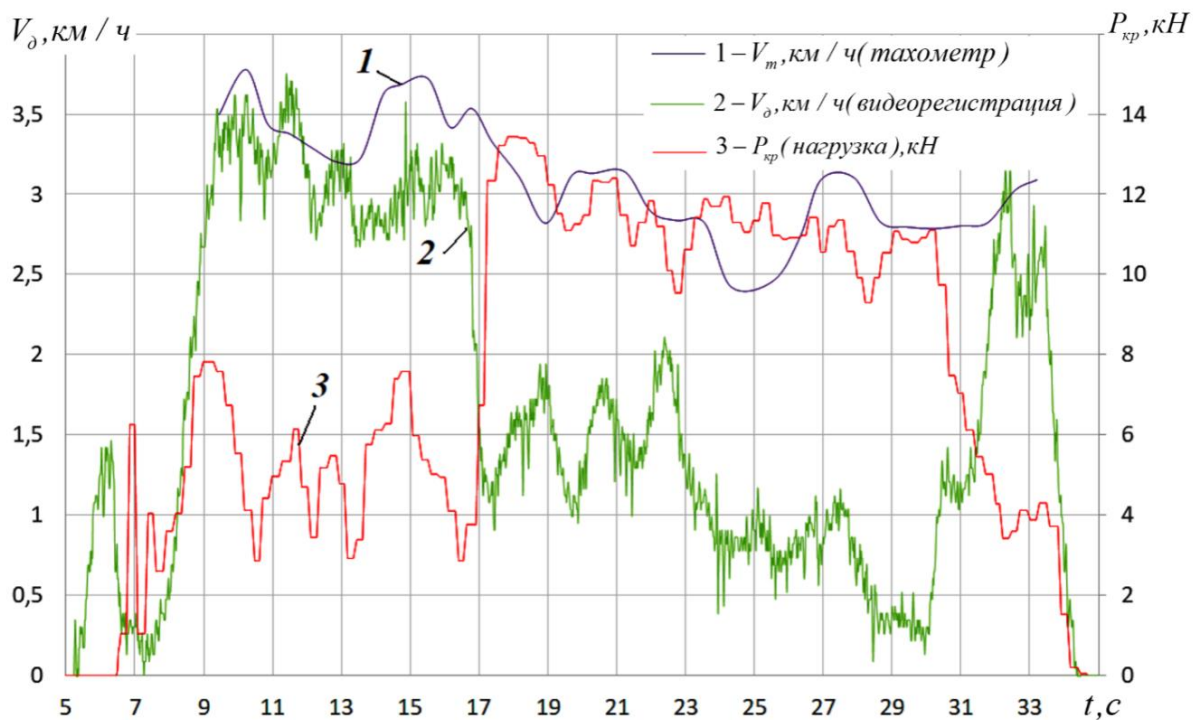
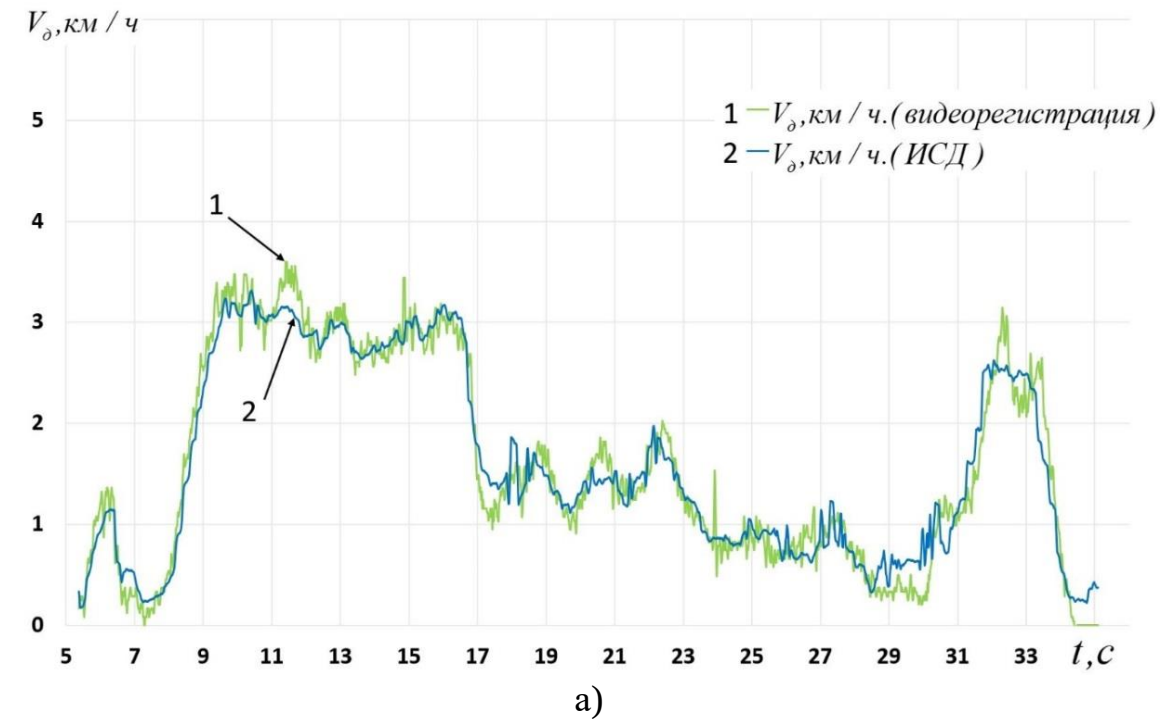


Рисунок 11 – Пример получаемых результатов исследований трактора с нагрузкой на участке – стерня: а – результат сопоставления скоростей разными устройствами; б – результат изменения теоретической скорости (1), действительной скорости (2) и тягового усилия $P_{кр}$ (3).

Полученные результаты испытаний показали адекватное изменение определенных скоростей движения трактора различными способами (рисунок 11,а) и их изменение относительно измеряемой теоретической скорости и величины измеряемого тягового усилия.

Дальнейшая обработка проводилась с целью определения изменения коэффициента буксования δ в процессе исследований. При обработке данных измерения скоростей производилось линейное сглаживание данных по семи последовательным значениям зарегистрированных значений для действительной скорости, полученной видеорегистратором и по трем – для теоретической скорости, полученной по частоте вращения колеса. Обработка этих данных позволила получить для каждого исследованного режима работы трактора-тягача характер изменения буксования. Пример получаемых результатов при такой обработке данных для одного из испытаний приведен на рисунке 12.



Рисунок 12 – Пример обработки результатов регистрации на стерне.

Для оценки качества измерений действительной скорости с помощью видеорегистрации опорной поверхности разработанным способом на каждом этапе исследований производилось определение действительной скорости с помощью прибора ИСД 3.1, результаты измерений которого принимались за «эталонные», и разработанным способом. Визуальное представление результатов сопоставления полученных данных от двух устройств было выполнено в виде графиков, на которых откладывались по оси абсцисс (x) показания прибора ИСД 3.1, а по оси ординат (y) результаты, полученные по разработанному способу с помощью видеорегистрации. Примеры получаемых графиков для испытаний без нагрузки и с нагрузкой на разных фонах показаны на рисунке 13.

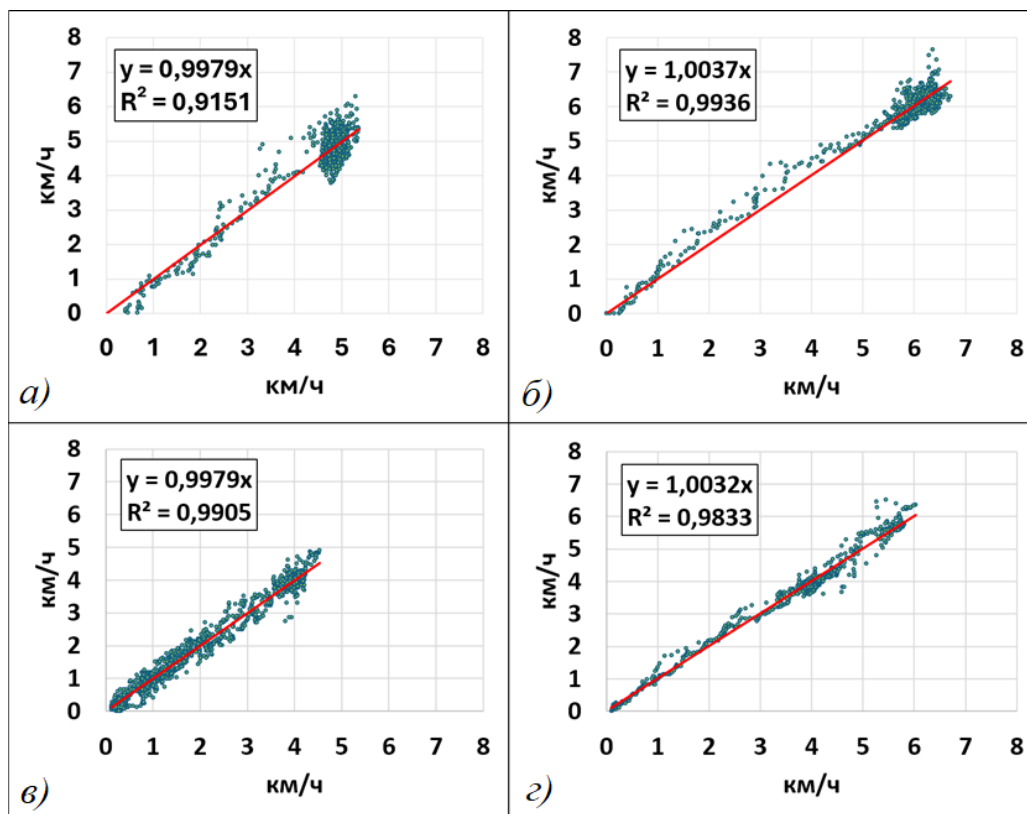


Рисунок 13 – Пример результатов сопоставления скоростей с помощью прибора ИСД 3.1 (ось абсцисс x) и видеорегистратора (ось ординат y): *а* (поле под посев) и *б* (асфальт) – движение без нагрузки; *в* и *г* – движение с нагрузкой по стерне на разных участках.

На графиках приведены уравнения для линий тренда полученных при обработке в Excel и значения коэффициента детерминации R^2 для полученных уравнений. Сопоставление результатов измерений действительной скорости по прибору ИСД 3.1 с результатами измерений по видеорегистратору по всем проведенным исследованиям на различных фонах опорной поверхности показали высокую достоверность результатов измерений, для которых во всех исследованиях коэффициент детерминации имел значения в диапазоне $R^2 = 0,88...0,98$. Значения коэффициента пропорциональности между x и y по уравнениям линий регрессии находилось в диапазоне $0,9966...1,0083$, т.е. его изменение было в пределах $\pm 1\%$.

Для оценки точности результата полученной действительной скорости был проведен анализ результатов методом оценки случайной погрешности измерений по известной методике. Результаты такого анализа показаны в таблице 2, где приведены для разных условий испытаний значения количество измерений действительной скорости n , значение случайной погрешности измерений ΔS_a и значение ошибки измеряемой скорости ΔV , полученной для доверительной вероятности 95%.

Таблица 2. Достоверность полученных экспериментальных данных

Условия испытаний	<i>n</i>	ΔS_a , км/ч	ΔV , км/ч
Без нагрузки поле под посев	1724	0,009	0,018
Без нагрузки полигон	1052	0,015	0,029
Без нагрузки стерня	1685	0,059	0,117
С нагрузкой стерня 2 (буксование)	622	0,009	0,017
С нагрузкой стерня 3 (буксование)	1617	0,006	0,011
С нагрузкой стерня 4 (буксование)	1405	0,008	0,016
С нагрузкой стерня 5 (буксование)	1584	0,009	0,017
Среднее значение			0,0345

Приведенные в таблице результаты показывают, что максимальная ошибка измерения действительной скорости была получена при испытаниях трактора на стерне без нагрузки и составила $\Delta V = 0,12$ км/ч. Среднее значение ошибки по всем результатам измерений получается $\Delta V_{\text{ср}} = 0,035$ км/ч, что по сравнению с другими методами измерений действительной скорости трактора в несколько раз меньше.

Таким образом, разработанный способ измерения действительной скорости трактора по видеорегистрации опорной поверхности может быть рекомендован для измерения величины буксования в процессе работы трактора и применения в системе для управления движением трактора по буксованию.

В пятой главе представлены результаты технико-экономической оценки эффективности использования контроля буксования при выполнении технологических операций трактором МТЗ-82 при использовании прибора ИСД 3.1 и разработанного способа по сравнению с базовым вариантом и даны рекомендации по использованию разработанного метода.

Результаты технико-экономической оценки проводились с учетом единовременных затрат от существующей технологии, единовременных затрат проектного варианта, численности трактористов-машинистов, численности ремонтных рабочих, ИТР и вспомогательного персонала, годовой загрузки трактора, затрат на топливо и смазочные материалы, затрат на техническое обслуживание и ремонт, годовых издержек и общих затрат.

По результатам расчётов годовая экономия на среднестатистический парк в количестве 25 тракторов МТЗ-82 в хозяйствах:

- при использовании прибора ИСД 3.1 для оценки буксования годовая экономия принимает отрицательное значение, т.е. нет целесообразности использования этого прибора на краткосрочный период т.к. это решение убыточное, экономический эффект за срок службы 10 лет составит 338 390 руб., и срок окупаемости единовременных затрат составит 2,4 года.
- при использовании разработанного устройства для оценки буксования с помощью видеорегистратора составит 2 953 325 руб., экономический

эффект составит 593 562 руб., а срок окупаемости единовременных затрат составит 0,1 года.

Разработаны рекомендации для устройства измерения действительной скорости видеорегистрацией опорной поверхности:

- по учёту различных факторов при монтаже разработанного устройства на тракторе;
- по настройке видеорегистратора при выполнении различных видов сельскохозяйственных работ в эксплуатационных условиях;
- по разработке программного обеспечения для видеорегистратора.

Заключение

1. Эффективность работы трактора во многом определяется степенью буксования движителя и для теоретического анализа его изменения и влияния на КПД движителя предложена зависимость для его определения. Зависимость включает безразмерные величины и учитывает касательную силу, сцепление движителя с опорной поверхностью, буксование и введенный новый эмпирический коэффициент - коэффициент податливости. Диапазон изменения коэффициента податливости k , для сельскохозяйственных тракторов составляет $k = 0,03 \dots 0,15$.
2. Анализ взаимосвязи буксования с КПД движителя показал существование оптимального по КПД значения буксования для каждого почвенного фона:
 - для поля, подготовленного под посев $\delta_m \approx 0,185$;
 - для стерни $\delta_m \approx 0,145$;
 - для целины или плотной залежи $\delta_m \approx 0,1$;
 - для асфальта или бетона $\delta_m \approx 0,04$.
3. Изменение оптимального значения буксования в процессе работы трактора требует его оперативного определения для обеспечения эффективности выполняемых работ. Эта задача теоретически была решена использованием разработанного способа видеорегистрации с трактора опорной поверхности.
4. Проведенная экспериментальная проверка в лабораторных и полевых условиях показала возможность использования разработанного способа измерения действительной скорости по видеорегистрации почти на всех фонах опорной поверхности, используемой в сельскохозяйственном производстве.
5. Разработана и апробирована методика обработки результатов видеорегистрации, которая позволяет определять действительную скорость движения машины при различных нагрузках и почвенных фонах, а также буксование движителя от 0 до 100%.

6. Максимальная ошибка измерения действительной скорости была получена при испытаниях трактора на стерне без нагрузки и составила $\Delta V = 0,12$ км/ч. Среднее значение ошибки по всем результатам измерений получается $\Delta V_{\text{ср}} = 0,035$ км/ч, что по сравнению с другими методами измерений действительной скорости трактора в несколько раз меньше. Таким образом, разработанный способ измерения действительной скорости трактора по видеорегистрации опорной поверхности может быть рекомендован к применению и использован для управления трактором по буксованию.
7. Разработаны рекомендации по монтажу, условиям эксплуатации и программному обеспечению для устройства измерения действительной скорости по разработанному способу видеорегистрацией опорной поверхности.
8. Техничко-экономическая оценка эффективности использования контроля буксования при выполнении технологических операций трактором МТЗ-82 при использовании существующего прибора ИСД 3.1 показала срок окупаемости 2,4 года, а устройства по разработанному способу – 0,1 года.

**Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах:**

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Результаты исследования определения действительной скорости тягово-транспортного средства по видеорегистрации / О. Н. Дидманидзе, С. Н. Девянин, А. В. Куриленко, А. С. Гузалов, Н. Н. Пуляев // Вестник Рязанского ГАТУ имени П. А. Костычева. – 2025. – Т. 17, № 3. – С. 90-96. – doi.org/10.36508/RSATU.2025.56.71.012.
2. Куриленко, А. В. Методика определения скорости трактора по видеонаблюдению / А. В. Куриленко // АгроЭкоИнженерия. – 2025. – № 3(124). – С. 120-133. – DOI 10.24412/2713-2641-2025-3124-120-132.

Публикации в других рецензируемых научных изданиях:

3. Куриленко, А. В. Буксование ведущих колес трактора и его эффективность работы / А. В. Куриленко // Наука без границ и языковых барьеров : Материалы всероссийской научно-практической конференции, Орел, 27–28 апреля 2023 года. – Орел: Орловский ГАУ имени Н.В. Парахина, 2023.
4. Девянин, С. Н. Оценка влияния различных факторов на максимальный тяговый КПД / С. Н. Девянин, А. В. Куриленко // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 17–18 января 2024 года. – Москва: РГАУ, ООО «Сам Полиграфист», 2024. – С. 225-229.