

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАЦИИ И
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИНЖЕНЕРНО-
ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА»
(ФГБНУ «РОСИНФОРМАГРОТЕХ»)

УДК 631.372: 62-1/-9: 608.2
Per. № НИОКТР 121071300042-7

УТВЕРЖДАЮ
Брио директора
ФГБНУ «Росинформагротех»,
канд. юрид. наук
Е.А. Подъяблонский
2021 г.



ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Исследование и разработка нового метода оптимизации балластировки трактора путем определения буксования колес с помощью элементов спутниковой навигации

по теме:

2.1.12 ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКА
СОВРЕМЕННОГО ПРИБОРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ
И ОБОРУДОВАНИЯ
(заключительный)

Директор КубНИИТиМ



М.И. Потапкин

Руководитель НИР,
зав. лабораторией разработки средств
измерений и программного обеспечения,
ведущий науч. сотр., д-р техн. наук

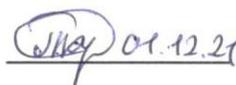


В.Е. Таркивский

Новокубанск 2021

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
зав. лабораторией разработки
средств измерений и
программного обеспечения,
ведущий науч. сотр.,
д-р техн. наук

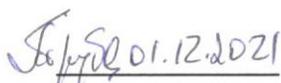
 01.12.21 В.Е. Таркивский
(методическое руководство)

Отв. исполнитель,
науч. сотр.

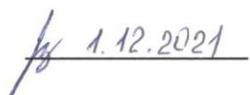
 01.12.21 А.Б. Иванов
(введение, разделы 1, 2, 3, 4, 5, 6
заключение)

Исполнители:

Гл. науч. сотр.,
канд. техн. наук

 01.12.2021 Н.В. Трубицын
(раздел 5, 6)

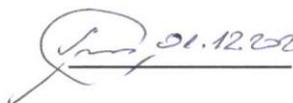
Науч. сотр.

 1.12.2021 Е.С. Воронин
(раздел 5, 6)

Инженер

 01.12.2021 В.Н. Слесарев
(раздел 5, 6)

Нормоконтроль

 01.12.2021 В.О. Марченко

РЕФЕРАТ

Отчет 56 с., 23 рис., 3 табл., 32 источн.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ, ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОСТЬ, ДАТЧИК, ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА, ОПТИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ, СЦЕПНОЙ ВЕС, БУКСОВАНИЕ, БАЛЛАСТИРОВКА, ГНСС

Объектом исследования являются методы и технические средства достижения оптимального сцепного веса трактора, первичные преобразователи и другие средства, и системы самоходных колесных машин, в которых реализована функция определения буксования движителей колесных сельскохозяйственных тракторов.

Цель работы – создание метода, позволяющего оценивать параметры буксования колесных сельскохозяйственных тракторов в реальном режиме времени и на основании полученной информации рассчитывать оптимальный вес балластных грузов.

Метод исследований – экспериментально-теоретический, основанный на анализе и лабораторном исследовании существующих методов определения параметров буксования.

Новизна работы состоит в разработке нового метода определения оптимального веса балласта трактора на основании данных о текущем буксовании.

Актуальность работы заключается в повышении эффективности эксплуатации энергонасыщенных тракторов за счет оптимизации тягово-сцепных свойств в зависимости от конкретных условий выполнения сельскохозяйственных операций.

Область применения – сельхозтоваропроизводители, МИС, НИИ Минсельхоза России, ВУЗы и другие организации, занимающиеся исследованиями и испытаниями сельскохозяйственной техники.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1 Состояние вопроса и выбор направления исследований.....	8
2 Программа и методика проведения исследования	15
3 Разработка метода определения текущего буксования трактора.....	16
4 Разработка метода расчета балластировки трактора.....	31
5 Экспериментальные исследования.....	38
5.1 Методика экспериментальных исследований.....	38
5.2 Разработка устройства определения буксования.....	39
5.3 Измерительно-регистрирующая аппаратура и программное обеспечение	41
6 Результаты экспериментальных исследований.....	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	51
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	53

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяются следующие сокращения и обозначения:

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

ИИС – измерительная информационная система

МИС – машиноиспытательная станция

МТА – машинно-тракторный агрегат

ПК – персональный компьютер

СИ – средство измерения

ТСУ – тягово-сцепное устройство

ЭТО – эксплуатационно-технологическая оценка

LOESS (locally estimated scatterplot smoothing) – метод локальных полиномиальных регрессий

GNSS (global navigation satellite system) – комплексная электронно-техническая система, состоящая из совокупности наземного и космического оборудования и предназначенная для определения местоположения (позиционирования), а также параметров движения (скорости, направления движения и др.) для различных целей.

ВВЕДЕНИЕ

Важным направлением деятельности Новокубанского филиала ФГБНУ «Росинформагротех» (КубНИИТиМ) является разработка методов и средств измерений для обеспечения оценки показателей сельскохозяйственной техники. Методы и средства измерений, разработанные в КубНИИТиМ, позволяют проводить оценку сельскохозяйственной техники в соответствии с национальными и межгосударственными стандартами на методы испытаний, а также способствуют как развитию отечественного сельскохозяйственного машиностроения, так и повышению эффективности сельскохозяйственного производства.

Технический уровень и энергетические возможности современных тракторов, позволяют обеспечить как их агрегатирование с широким спектром сельскохозяйственных орудий различного назначения и различных производителей, так и выполнение технологических операций в широком диапазоне внешних условий (твердость и влажность почвы, характер микро- и макрорельефа полей и т.п.). Такие возможности обеспечиваются в первую очередь за счет повышения энергонасыщенности тракторов.

Однако, рациональное использование энергетических возможностей двигателя невозможно без обеспечения необходимых тягово-сцепных свойств движителей трактора.

Следствием недостаточности воспринимаемого шинами трактора веса является повышенное буксование и невозможность реализации необходимого тягового усилия. Кроме того, повышенное буксование приводит к ускоренному износу шин, снижению тягового КПД и ухудшению топливной эффективности и производительности МТА. Также, повышенное буксование приводит к истиранию поверхности почвы, что приводит к ухудшению структуры почвы, повышению подверженности ветровой эрозии, ухудшению влаго- и воздухопроницаемости и, в конечном счете, к снижению плодородия. Не ме-

нее часто трактор эксплуатируется с превышением достаточного для реализации необходимого тягового усилия весом. Буксование движителей трактора в данном случае мало, однако увеличиваются потери мощности на перекатывание и на уплотнение почвы, что также приводит к снижению топливной эффективности и производительности. Также излишний вес трактора влечет за собой увеличенный износ элементов трансмиссии и повышенные нагрузки на несущие элементы рамы и подвески. Излишнее переуплотнение по следу движителей приводит к снижению плодородия почвы.

Конструкция современных сельскохозяйственных тракторов предусматривает достаточно широкий диапазон балластировки, разработаны рекомендации по оптимальной величине (и способах ее достижения) буксования на различных типах почв, однако практическую сложность для механизатора представляет измерение и контроль буксования движителей при рядовой эксплуатации трактора.

Поэтому разработка метода, позволяющего в режиме реального времени оценивать величину буксования движителей трактора при выполнении сельскохозяйственных операций, является важной задачей.

Цель работы – разработка метода оптимизации балластировки трактора путем определения буксования колес с помощью элементов спутниковой навигации.

Разработанный метод может найти применение в сельскохозяйственных предприятиях, а также в ВУЗах, НИИ и машиноиспытательных станциях Минсельхоза России при исследованиях и испытаниях сельскохозяйственной техники и технологий.

1 Состояние вопроса и выбор направления исследований

Технический уровень ходовой системы трактора, прежде всего, определяется тягово-сцепными качествами, степенью воздействия ее на почву, надежностью, материалоемкостью, плавностью хода, грузоподъемностью, устойчивостью, управляемостью и др. показателями [1]-[4]

Тягово-сцепные качества определяют производительность машинно-тракторного агрегата, его расход топлива, зависимость от неблагоприятных погодных условий. Воздействие на почву – важнейший показатель для трактора, так как он непосредственно влияет на продуктивность почв, определяет энергозатраты на последующую обработку полей. Плавность хода также относится к основным функциональным характеристикам движителя, так как именно она ограничивает скорость агрегата, определяет качество полевых работ и комфортность условий труда механизатора, уровень вибронегативности узлов машины.

Другой глобальной задачей является сохранение плодородия почв, в ее решении велика роль движителей полевой техники. К сельскохозяйственному трактору предъявляются особые требования, так как он взаимодействует с почвой, которая одновременно является опорным основанием и обрабатываемым материалом – сложной биоминеральной средой. Уплотнение почвы и интенсивное перетиравание ее структурных составляющих в результате буксования, отрицательно сказывается на плодородии, сопутствует развитию эрозии, ведет к деградации почв.

В первую очередь существенно ухудшаются основные физические и технологические свойства пахотного и подпахотного слоев почвы и снижается плодородие. Ухудшается структурное состояние почвы, вследствие разрушения не только макро-, но и микроструктурных агрегатов, повышается содержание пыли в пахотном слое [5]-[7]. В колее тракторов резко возрастает плотность и твердость почвы [8]-[11]. Например, плотность Кубанских черноземов при проходах колесных тракторов повышается с 1,1-1,3 г/см³ до 1,4-1,6 г/см³.

На 10-20 % уменьшается общая пористость почвы и на 30-60 % пористость аэрации.

Образующаяся колей затрудняет в дальнейшем работу сельхозмашин, вызывает неравномерную заделку семян, снижение их полевой всхожести, обуславливает многоярусность посевов и неодновременность их созревания. Это в конечном итоге ведет к недобору урожая сельскохозяйственных культур, который по оценкам ВИМ и Почвенного института им. В. В. Докучаева, только по зерновым составляет 13-15 млн. т. в год, сахарной свекле – более 2 млн. т., зерну кукурузы – около 0,5 млн. т. в год [12].

Снижение урожайности происходит не только в год уплотнения, но и в последующие: 2-й и 3-й годы, так как процессы разуплотнения пахотного и подпахотного слоев проходят в течение нескольких лет. Для устранения уплотнения подпахотных слоев требуется дополнительная обработка, связанная со значительными трудозатратами и дополнительным расходом топлива.

Деграцию структуры почвы (ДСП) можно рассматривать как в рамках морфологии почвы (описание профиля), так и в рамках измерительных характеристик. Плотность – наиболее распространенный визуальный признак ДСП. Почвенные агрегаты спрессовываются в крупные и плотные блоки, объем которых равен объему вытесненного воздуха. Вторым визуальным признаком является «пластообразность» структуры почвы. Такая структура – серьезное препятствие для проникновения корней и влаги в нижние слои. На рисунке 1 показаны срезы почвы в зоне движения техники (а) (глубина 0-24 см) и в зоне (б) свободной от уплотнения. На (а) явно различима деграция структуры почвы в виде пластинчатой структуры, в то время как на (б) почва имеет рыхлую структуру, изобилующую порами (черный цвет), особенно в верхнем слое.

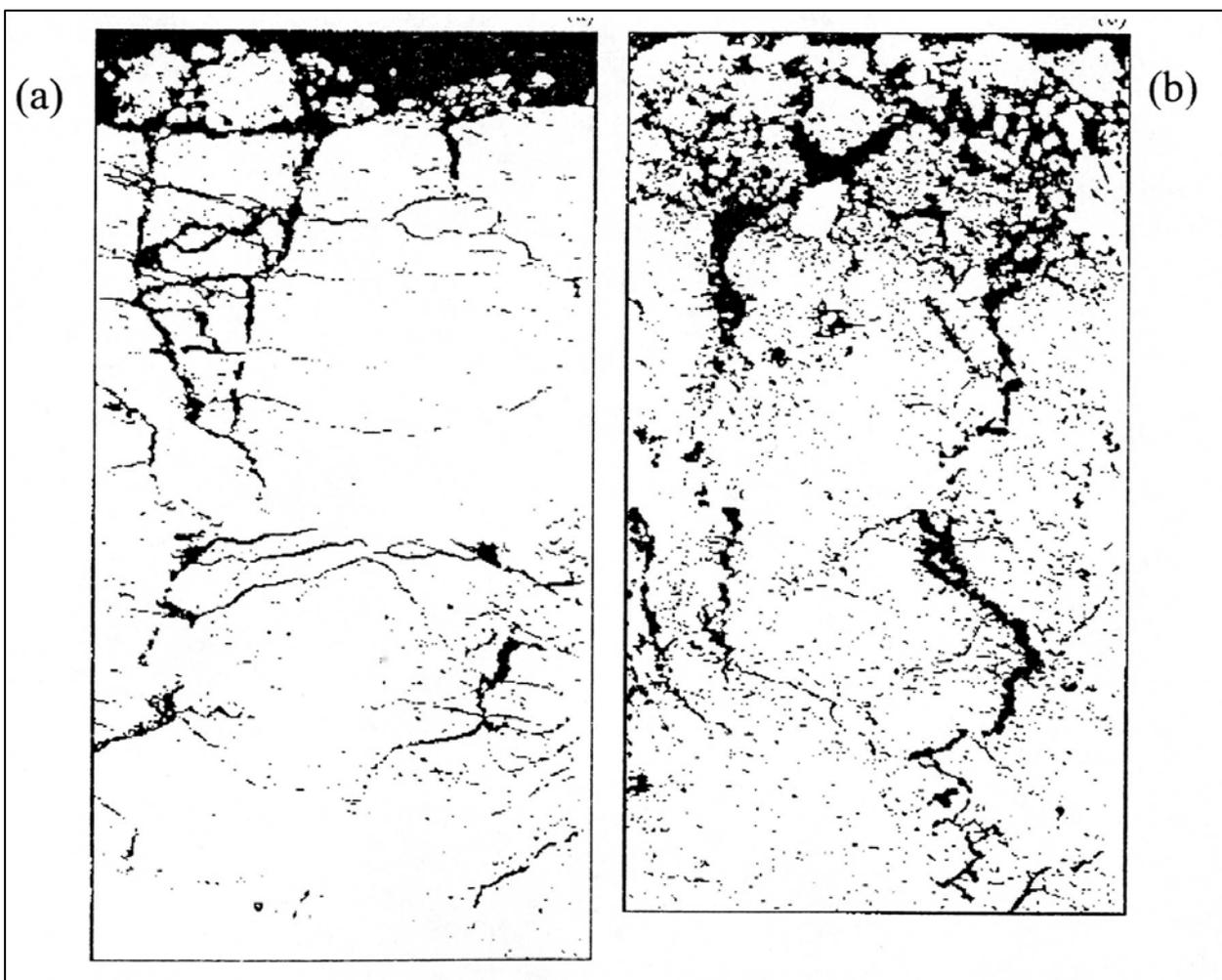


Рисунок 1 – Изображение структуры почвы в зоне движения техники (а) и на участке, свободном от воздействия движителей (б)

Для обработки сильно уплотненных почв затрачивается дополнительная энергия, снижается производительность агрегатов. В результате исследований влияния уплотнения почвы на ее сопротивление при обработке плугами, проведенных в СКС ВИМ [11], [12], выяснилось, что удельное сопротивление при вспашке почвы на глубину 20-22 см по следам гусеничных и легких колесных тракторов было выше на 12-25 %, чем вне следов, по следам тракторов Т-150К и К-701 на 44 % выше, автомобилей и комбайнов – на 60-64 %, транспортных тракторных агрегатов с прицепами – на 72-90 %, что приводит к годовому перерасходу топлива около 1 млн. т.

Для уменьшения отрицательного воздействия ходовых систем машино-тракторных агрегатов применяются технологические, агрономические и конструкторские мероприятия [1], [13].

Технологические мероприятия – снижение числа проходов сельскохозяйственной техники по полям, совмещенные технологии, рациональная маршрутизация движения, применение комбинированных и широкозахватных агрегатов, минимальной обработки почвы, устройство постоянных полос для проезда техники, использование перегрузочной технологии при взаимодействии с транспортными средствами.

Агрономические – повышение способности почвы противостоять уплотняющим и сдвигающим нагрузкам благодаря внесению удобрений (главным образом органических), введение дополнительной операции разуплотнения (путем глубокого ступенчатого чизелевания, глубокой вспашки и вспашки с полосным рыхлением [9], [14]).

Конструкторские – совершенствование тракторов и сельхозмашин, их движителей, снижение их материалоемкости, применение движителей с увеличенной опорной поверхностью, повышение их тягово-сцепных свойств. Ухудшение последних ведет к снижению рабочей скорости и тягового усилия, увеличению расхода топлива, повышению изнашиваемости элементов трансмиссии и ходовой системы из-за повышенного буксования.

Конструкторское направление – наиболее эффективное средство решения проблемы переуплотнения почвы, так как легче и дешевле предотвратить механическое воздействие движителей на почву, чем затем устранять его последствия. Следует также отметить, что агрономическое направление хотя и снижает негативное воздействие переуплотнения почв, но не может устранить его полностью [13].

К основным конструкторским мероприятиям, направленным на улучшение тяговых показателей и проходимости тракторов, можно отнести:

- увеличение сцепного веса;
- применение рациональных размеров шин и рисунка протектора;
- установка оптимального давления воздуха в шинах;
- использование всех колес трактора в качестве ведущих;

- рациональное распределение по осям эксплуатационного веса трактора;
- применение многоосных ходовых систем и увеличение числа ведущих мостов;
- блокировка дифференциала ведущих колес;
- применение активных прицепов и рабочих органов сельскохозяйственных машин;
- увеличение опорной поверхности путем сдвигания (страивания) колес;
- увеличение площади контакта за счет применения дополнительных приспособлений (полугусеничный ход, уширительные колеса, накладные почвозацепы и т.д.).

Сельскохозяйственные тракторы эксплуатируются в условиях, существенно варьирующихся в зависимости от природно-климатических и естественно-производственных зон. Поэтому следует отметить, что производительность, топливная и энергетическая эффективность выполнения сельскохозяйственных операций, а также снижение техногенного воздействия трактора на почву, значительно зависит от рационального использования возможностей, обусловленных конструкцией трактора.

Выходным параметром, характеризующим тягово-сцепные свойства трактора, является буксование δ , %, которое в общем случае определяется отношением величины снижения скорости к возможному ее теоретическому значению при движении без буксования

$$\delta = \left(1 - \frac{v_{\text{факт}}}{v_T}\right) \cdot 10^2, \quad (1)$$

где v_T – теоретическая скорость движения без буксования, м/с;

$v_{\text{факт}}$ – фактическая скорость движения, м/с.

На основании многочисленных проведенных исследований установлено, что наиболее оптимальным, как в аспекте энергетической эффективности, так и в аспекте сбережения почв, является вес трактора, обеспечивающий выполнение работ с буксованием в диапазоне 10-15 % [15]-[18].

Одним из доступных рядовому пользователю методов достижения оптимальной величины буксования является изменение силы сцепления с помощью балласта, обеспечивающего увеличение силы тяги до 20 % при одновременном снижении буксования. Для определения необходимого сцепного веса, производителями тракторов и исследователями, рекомендуется алгоритм, который в общем виде выглядит следующим образом:

- нанести метки на ведущее колесо трактора и измерить длину его окружности;
- отмерить и отметить на поле достаточное расстояние;
- выполнить работу, одновременно подсчитывая количество оборотов колеса на отмеченном участке поля;
- рассчитать буксование колес, как отношение произведения длины окружности колеса на количество его оборотов к длине отмеченного участка;
- в зависимости от полученного значения буксования увеличить или уменьшить вес трактора;
- повторять процедуру до получения необходимых значений буксования.

Однако, согласно результатам исследований американских инженеров Agricultural Technology Centre (ранее называвшийся Alberta Farm Machinery Research Centre), большинство тракторов эксплуатируется с несоответствующим весом, а это, в свою очередь, приводит к излишнему потреблению топлива в количестве около 150 млн. галлонов (567,8 млн. л) в год [19]. Причиной этого является то, что несмотря на кажущуюся доступность, данный алгоритм применяется недостаточно широко в силу значительной трудоемкости как самой процедуры определения буксования, так и непосредственно процедуры

изменения балластировки трактора. Практическую сложность для механизатора представляет, как процедура измерения и контроля буксования, так и расчет необходимого изменения веса трактора, что ведет к увеличению количества итераций описанной выше процедуры. Данные недостатки усугубляются необходимостью повторения процедуры при изменении вида и условий работ.

Таким образом, в рамках исследовательской работы необходимо решить следующие задачи:

1) Разработать доступный при обычной эксплуатации трактора метод, позволяющий механизатору с необходимой точностью и минимальными затратами контролировать текущее буксование движителей трактора.

2) Разработать математическую модель, позволяющую на основе известных значений буксования рассчитать необходимое изменение веса трактора, с наибольшей вероятностью обеспечивающее оптимальные тягово-сцепные свойства для выполняемого вида работ в сложившихся условиях.

2 Программа и методика проведения исследования

Проведение исследований проводилось по программе, включающей в себя следующие этапы:

- теоретическая разработка метода непрерывного контроля буксования колес трактора с помощью элементов спутниковой навигации;
- теоретическая разработка математической модели, позволяющей на основе известных значений буксования рассчитать необходимое изменение веса трактора;
- разработка программы экспериментальных полевых исследований;
- разработка и изготовление оборудования для проверки разработанного метода в условиях полевого опыта;
- разработка программного обеспечения для реализации разработанного метода в среде Windows;
- проверка результатов теоретических исследований в условиях полевого опыта;
- анализ полученных в ходе исследований результатов и подготовка итогового отчета.

3 Разработка метода определения текущего буксования трактора

При проведении испытаний и исследований показателей эффективности работы МТА, для определения буксования, на ведущие колеса трактора устанавливают датчики угла поворота (рисунок 2) [20], [21]. В этом случае, буксование каждого движителя δ_i , %, определяется как отношение количества оборотов колеса при движении трактора без нагрузки n'_{Ki} , ед. к количеству оборотов колеса при движении трактора с нагрузкой на крюке n_{Ki} , ед., при одной и той-же длине гона

$$\delta_i = \left(1 - \frac{n'_{Ki}}{n_{Ki}}\right) \cdot 10^2, \quad (2)$$

а при использовании путеизмерителя

$$\delta_i = \left(1 - K_i \frac{I_s}{I_i}\right) \cdot 10^2, \quad (3)$$

где I_s – количество импульсов датчика путеизмерителя, ед;

I_i – количество импульсов датчика i -го ведущего движителя, ед;

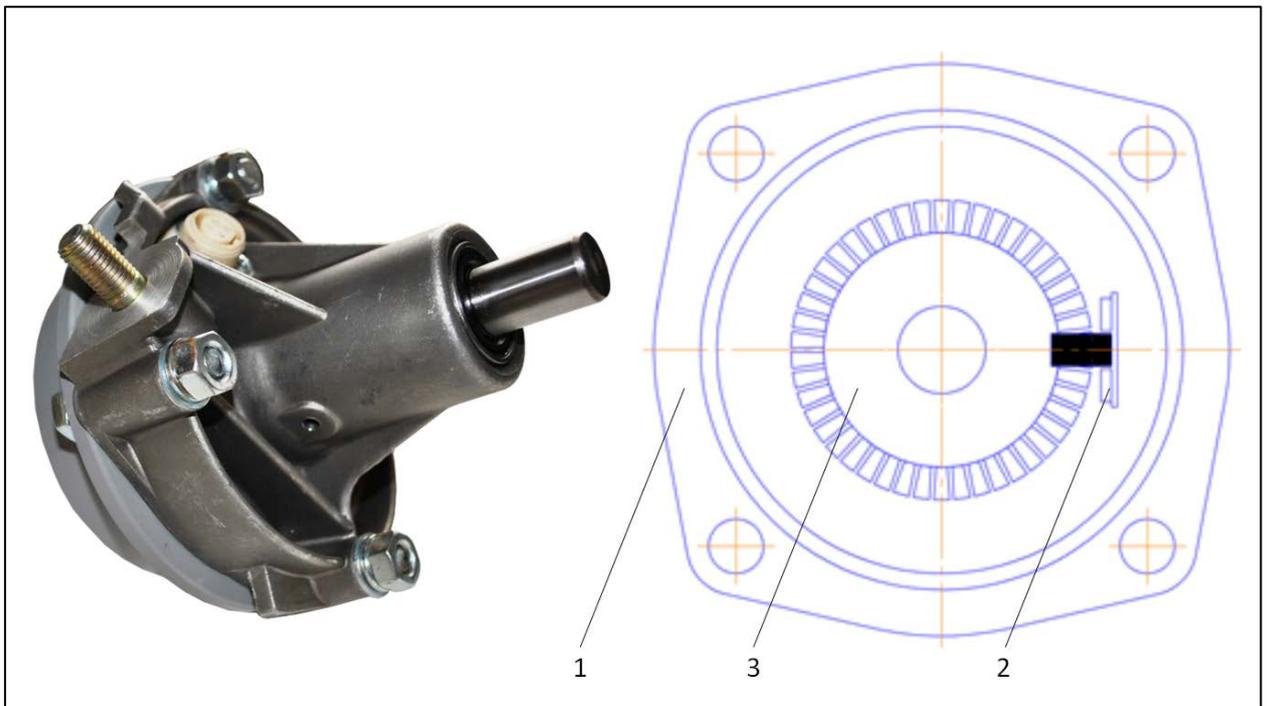
K_i – коэффициент i -го ведущего движителя, полученный при проезде трактора без нагрузки (с нулевым буксованием) по участку фиксированной длины с ровным покрытием.

Коэффициент буксования трактора δ , %, вычисляется по формуле

$$\delta = \frac{1}{n_{в.д.}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{в.д.}} \delta_i = \frac{1}{n_{в.д.}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{в.д.}} \left(1 - K_i \frac{I_s}{I_i}\right) \cdot 10^2, \quad (4)$$

где $n_{в.д.}$ – количество ведущих движителей, ед.

Описанный метод определения буксования характеризуется высокой точностью, но в силу многих причин не применим для постоянного использования при рядовой эксплуатации сельскохозяйственного трактора [22]. В то же время, существует теоретическая возможность определения буксования более простым способом.



1 – корпус датчика; 2 – оптический элемент; 3 – диск с вырезами

Рисунок 2 – Датчик угла поворота колес ИП-268 разработки КубНИИТиМ

В общем случае, буксование как кинематический фактор, определяется отношением величины снижения скорости к возможному ее теоретическому значению при движении без буксования по формуле (1).

Поскольку теоретическая скорость колеса имеет прямую зависимость от частоты вращения приводного вала трансмиссии, то в пределах одного передаточного отношения трансмиссии, принимая динамические радиусы качения колес неизменными, а движение трактора равномерным и прямолинейным, представляется возможным рассчитать значение буксования по формуле

$$\delta = \left(1 - \frac{v_{\text{факт}}}{k' \cdot n_e}\right) \cdot 10^2, \quad (5)$$

где n_e – частота вращения коленчатого вала двигателя, с^{-1} ;

k' – коэффициент, получаемый отношением фактической скорости $v'_{\text{факт}}$ к частоте вращения n'_e коленчатого вала двигателя при движении трактора без нагрузки (с нулевым буксованием)

$$k' = \frac{v'_{\text{факт}}}{n'_e}, \quad (6)$$

Оценка уровня буксования косвенным методом, путем измерения частоты вращения коленчатого вала двигателя более предпочтительна с точки зрения доступности, поскольку не требует сложного навесного монтажа дорогостоящих датчиков угла поворота. Однако, перед выбором направлений развития указанного метода, позволяющего обеспечить контроль буксования при длительной эксплуатации тракторов в реальных условиях, следует оценить возможность его практического использования наряду с существующими, общепринятыми методиками.

Для проведения сравнительной оценки методов определения буксования на основе эмпирических данных тяговой характеристики трактора, оценки точности и адекватности разрабатываемой модели, были проанализированы результаты измерения буксования колес трактора Беларусь 3522, полученные при определении тяговых показателей на асфальтобетонном треке, на 2-й передаче 2-го диапазона трансмиссии.

Одновременно с буксованием каждого колеса δ_i , %, измерялись значения нагрузки на крюке R_T , кН, частоты вращения коленчатого вала двигателя n_e , мин⁻¹ и фактической скорости движения трактора $v_{\text{факт}}$, м/с. Результаты измерений при 11 значениях нагрузки на крюке в диапазоне от 0 до 93,87 кН представлены в таблице 1.

По экспериментальным данным, представленным в таблице 1, были рассчитаны значения буксования $\delta_{(ф.3)}$ и $\delta_{(ф.5)}$ по формулам (4) и (5) соответственно, при этом коэффициент k' , необходимый для расчета по формуле (5) определялся по результатам измерений при $R_T = 0,08$ кН (экспериментальная точка №1 в таблице 1) и составил $9,61 \cdot 10^{-4}$.

Таблица 1 – Результаты определения тяговой характеристики трактора Беларусь 3522 на 2-й передаче 2-го диапазона трансмиссии

№ Эксп. точки	Нагрузка на крюке R_T , кН	Частота вращения к.в. n_e , мин ⁻¹	Скорость движе- ния $v_{\text{факт}}$, м/с	Буксование колес:			
				передние		задние	
				правое δ_1 , %	левое δ_2 , %	правое δ_3 , %	левое δ_4 , %
1	0,08	2280	2,19	0,00	0,00	0,00	0,00
2	30,35	2260	2,12	2,02	2,36	2,07	1,63
3	41,72	2252	2,09	3,16	2,12	2,33	1,89
4	55,75	2244	2,07	3,23	3,90	3,33	3,33
5	58,50	2240	2,05	3,46	4,14	3,91	3,47
6	80,00	2216	1,97	7,19	6,85	5,81	7,53
7	81,35	2212	1,95	7,03	9,00	6,12	9,51
8	84,02	2204	1,92	11,37	7,09	10,84	7,90
9	86,79	2192	1,88	13,07	9,20	12,46	9,99
10	92,60	2144	1,79	13,41	13,71	12,41	14,46
11	93,87	2132	1,73	19,98	12,50	16,66	15,86

Поскольку исходные экспериментальные данные, на основании которых проводился расчет, содержат в себе случайную неопределенность, для возможности оценки эквивалентности расчета буксования по формулам (4) и (5), перед нами встала задача построения регрессионной модели зависимости буксования от тяговой нагрузки на крюке $\delta = f(R_T)$, которая должна удовлетворять следующим основным требованиям (в порядке приоритета):

1) функция должна отражать физический смысл взаимосвязи буксования и тяговой нагрузки на крюке (непрерывная, нелинейная, возрастающая на всем диапазоне фактических значений R_T , функция без экстремальных точек и точек перегиба);

2) функция должна максимально точно отражать эмпирический характер, определенный экспериментальными значениями (отклонения значений функции при каждом R_{T_i} от фактических значений, должны отражать только случайную ошибку опыта и не зависеть от R_T);

3) значения функции должны максимально приближаться к экспериментальным значениям.

Наличие 1-го пункта функциональной формы, исключило возможность применения линейной и полиномиальной регрессионных моделей. Широко известные формулы зависимости коэффициента буксования от удельной силы тяги (7), (8), разработанные для промышленных тракторов Ю.В. Гинзбургом [9], [10], обеспечивают достаточную точность при удельном тяговом усилии в диапазоне, близком к максимальному тяговому КПД, однако на иных участках тяговой характеристики приводят к значительному отклонению от эмпирических значений, полученных в результате эксперимента.

$$\delta = 1 - \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{max}}\right)^a, \quad (7)$$

$$\delta = 1 - \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{max}}\right)^{0,1\left(1 + \frac{\varphi}{\varphi_{max}}\right)}, \quad (8)$$

где φ и φ_{max} – удельная сила тяги и её максимальное значение на ведущих движителях соответственно;

a – эмпирический коэффициент.

Поэтому использование их в качестве основы для регрессионной модели в рамках поставленной задачи, оказалось неприменимым.

Более перспективным, для достижения поставленной в работе цели, представляется подход, предложенный В.И. Саяпиным [23], который предлагал использовать разные виды эмпирических функций в зависимости от диапазона тягового усилия

$$\left. \begin{aligned} \delta &= a\varphi \text{ при } \varphi \leq 0,5 \text{ и} \\ \delta &= b\varphi^c + t \text{ при } \varphi \geq 0,5 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где a, b, c, t – эмпирические коэффициенты.

Сама по себе, формула (9), как и предыдущая, не дает полностью удовлетворительного результата, однако заложенный в ней принцип деления области определения функции на характеризующие интервалы был принят за основу построения регрессионной модели.

В результате проведенного исследования, для построения регрессионной модели, был применен метод LOESS (locally estimated scatterplot smoothing – метод локальных полиномиальных регрессий) [24]-[26], который является методом непараметрической регрессии и заключается в объединении нескольких регрессионных моделей в метамодель на основе определенного размера окна взвешивания вокруг каждой точки данных.

В качестве недостатка LOESS можно указать то, что он не создает функцию регрессии, которую легко представить математической формулой. С другой стороны, в нелинейной регрессии, чтобы обеспечить оценку неизвестных параметров и экспериментальной неопределенности, достаточно представить только функциональную форму [27], [28]. Для нашего случая, регрессионную модель можно записать в виде

$$\delta = f(R_T) := \text{interp}[LOESS(X, Y, span), X, Y, R_T], \quad (10)$$

где X и Y – массив фактических значений аргумента и массив

соответствующих фактических значений функции;

$span$ – параметр, определяющий процентную долю общего числа точек в окне взвешивания вокруг каждой точки данных, такой что

$$1 < span \cdot n < 2n, \quad (11)$$

где n – число степеней свободы регрессионной выборки.

Это обусловлено, с одной стороны тем, что число точек, по которым выполняется усреднение для каждой последовательной аппроксимации, должно быть не менее 2-х, а с другой, при значении $span = 2$, регрессионная функция вырождается в полином 2-й степени.

В нашем случае, опытным путем было выбрано значение параметра $span = 0,91$. Следует отметить, что меньшие значения параметра дают лучшее приближение к экспериментальным данным, однако при этом наблюдаются явно выраженные экстремумы и точки перегиба, т.е. несоответствие описанной выше функциональной форме.

График функции $\delta = f(R_T)$ представлен на рисунке 3, значения функции, соответствующие опытным R_{T_i} , а также отклонения экспериментальных и рассчитанных по формулам (3), (4) и (5) значений буксования – в таблице 2.

Таблица 2 – Регрессионная модель буксования колес трактора Беларус 3522

№ эксп. точки	$\delta = f(R_T), \%$	$\delta_{(\Phi.3)} = \frac{1}{n_{в.д.}} \sum_{i=1}^{n_{в.д.}} \delta_i, \%$	$\delta_{(\Phi.5)} = \left(1 - \frac{\nu_{факт}}{k' \cdot n_t}\right) \cdot 10^2, \%$	$\Delta_i = \sqrt{(\delta_{(\Phi.3)_i} - f(R_{T_i}))^2}, \%$	$\Delta_i = \sqrt{(\delta_{(\Phi.5)_i} - f(R_{T_i}))^2}, \%$	$\Delta_i = \sqrt{(\delta_{1_i} - f(R_{T_i}))^2}, \%$	$\Delta_i = \sqrt{(\delta_{2_i} - f(R_{T_i}))^2}, \%$	$\Delta_i = \sqrt{(\delta_{3_i} - f(R_{T_i}))^2}, \%$	$\Delta_i = \sqrt{(\delta_{4_i} - f(R_{T_i}))^2}, \%$
1	0,09	0,00	-0,01	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09
2	1,50	2,02	2,33	0,52	0,99	0,52	0,85	0,57	0,13
3	2,32	2,38	3,08	0,05	0,88	0,84	0,20	0,01	0,43
4	3,37	3,45	4,13	0,08	0,82	0,14	0,53	0,04	0,04
5	3,68	3,75	4,53	0,07	0,87	0,22	0,46	0,23	0,21
6	7,64	6,84	7,60	0,80	0,37	0,45	0,79	1,83	0,11
7	8,20	7,91	8,66	0,29	0,02	1,18	0,79	2,09	1,31
8	9,42	9,30	10,21	0,12	0,05	1,95	2,32	1,42	1,51
9	10,85	11,18	11,95	0,33	0,03	2,22	1,65	1,61	0,86
10	14,38	13,50	14,74	0,89	1,34	0,97	0,67	1,98	0,08
11	15,25	16,25	17,86	1,00	0,10	4,73	2,75	1,41	0,61
$\Delta = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{(\delta_i - f(R_{T_i}))^2}, \%$				0,138	0,226	0,351	0,333	0,408	0,224

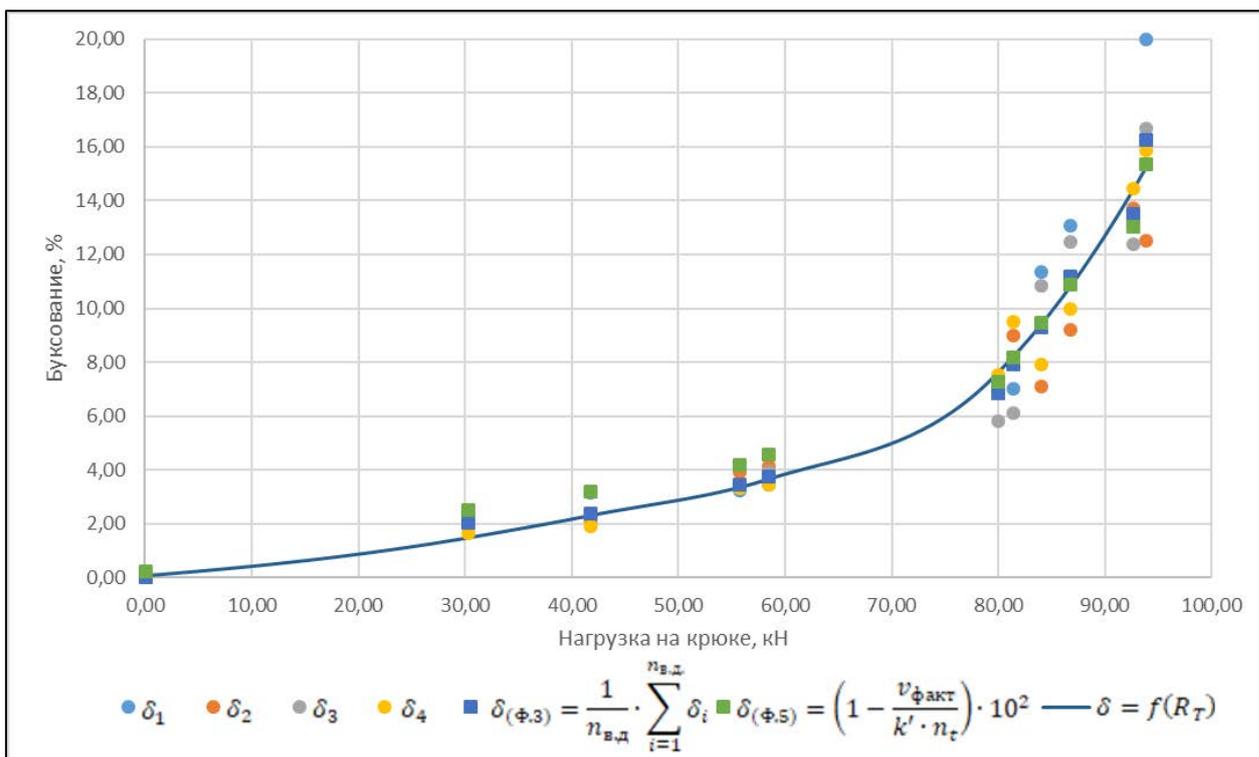


Рисунок 3 – Регрессионная модель буксования колес трактора Беларусь 3522

Из таблицы 2 и рисунка 3 следует, что расчет буксования по измеренным значениям фактической скорости и частоты вращения коленчатого вала двигателя в соответствии с формулой (5), приводит к большей средней ошибке в абсолютном выражении по сравнению с общепринятым методом определения. В тоже время отчетливо видно, что при сокращении количества измеряемых параметров при базовом методе (установка датчиков на только один или даже два ведущих движителя), ожидаемая средняя ошибка существенно превысит ошибку предложенного альтернативного метода. А относительная неопределенность 1,51 % в целевом диапазоне абсолютных значений буксования 8-16 % в сочетании с технической доступностью, позволяют отнести предложенный подход к приоритетным направлениям в развитии методов, позволяющих обеспечивать контроль буксования при длительной эксплуатации тракторов в реальных условиях.

Рассмотренный метод существенно упрощает процедуру определения буксования и делает ее более доступной для применения в условиях реальной

эксплуатации трактора, однако необходимость использования путеизмерительного колеса (рисунок 4) для определения фактической скорости $v_{\text{факт}}$ и $v'_{\text{факт}}$, продолжает накладывать значительные ограничения на распространение метода.

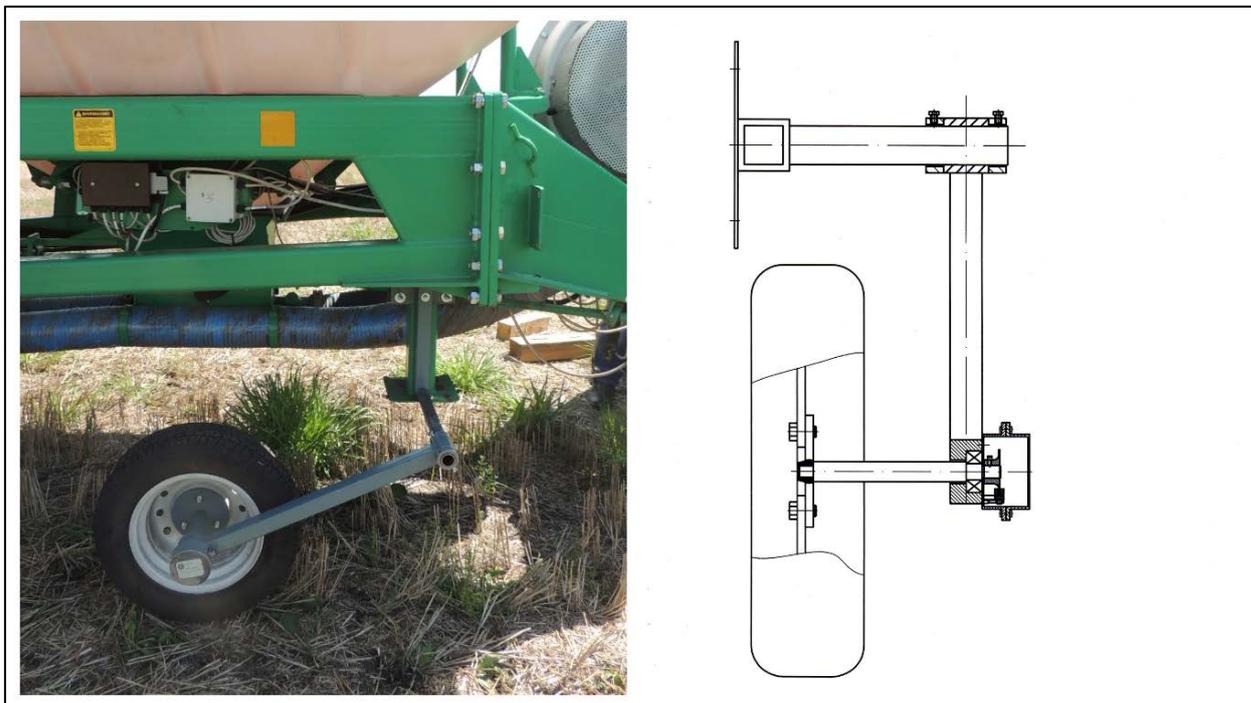


Рисунок 4 – Путеизмеритель ИП-266 разработки КубНИИТиМ

Решением проблемы измерения фактической скорости может являться использование возможностей GNSS (global navigation satellite system) – комплексной электронно-технической системы, состоящей из совокупности наземного и космического оборудования и предназначенной для определения местоположения (позиционирования), а также параметров движения (скорости, направления движения и др.) для различных целей. Методы определения скорости с использованием GNSS можно разделить на дифференциальные и точечные. Дифференциальные методы обеспечивают максимальную точность, однако предполагают использование данных от опорных станций, имеющих ограниченную область покрытия, либо двухчастотных приемников GNSS. Эти методы, в настоящий момент, недоступны для широкого круга потребителей в силу высокой стоимости как оборудования, так и эксплуатации.

Точечные методы, для которых достаточно данных лишь одночастотного приемника потребителя, характеризуются значительно большей доступностью, однако обладают существенно меньшей точностью. Основные точечные методы основаны на технологии точечного позиционирования и прямых доплеровских измерениях. При использовании метода точечного позиционирования, в режиме одометра, возможно измерить расстояние между двумя положениями приемника GNSS по вычисленным координатам широты, долготы и высоты в каждом положении с точностью $\Delta S_{PP} = \pm 5$, м. А при использовании метода прямых доплеровских измерений, по изменению частоты и, соответственно, длины волны сигнала спутника, воспринимаемого приемником, вычисляется непосредственно скорость движения приемника GNSS. Максимальная погрешность такого измерения составляет $\Delta v_{DM} = \pm 0,02 \cdot v_{\text{факт}}$, м/с. Обе данные технологии используются в самых различных сферах деятельности человека, непрерывно развиваются и совершенствуются, однако существующие на текущий момент технические ограничения по точности определяемых параметров требуют расчета их влияния на конечную точность определения буксования.

Поскольку буксование является косвенной величиной, определяемой несколькими, независимо измеряемыми, величинами, значение результирующей погрешности $\Delta\delta$, % будет определяться суммой произведений частных производных первого порядка по каждому аргументу на абсолютные погрешности измеряемых величин.

При определении буксования в соответствии с ISO 789-9 по формуле (2), измеряется только количество оборотов ведущих колес n'_K и n_K (подразумевается проезд трактора с нагрузкой и без нагрузки по одному и тому же участку, поэтому погрешностью измерения длины участка можно пренебречь), то результирующую погрешность можно определить

$$\Delta\delta_{ISO} = \sqrt{\left(\frac{10^2}{\bar{n}_K} \cdot \Delta n'_K\right)^2 + \left(\frac{\bar{n}'_K \cdot 10^2}{\bar{n}_K^2} \cdot \Delta n_K\right)^2}, \quad (12)$$

где \bar{n}'_K и $\Delta n'_K$ – соответственно математическое ожидание и абсолютная погрешность измерения количества оборотов колеса при проезде трактора без нагрузки, ед.;

\bar{n}_K и Δn_K – соответственно математическое ожидание и абсолютная погрешность измерения количества оборотов колеса при проезде трактора с нагрузкой на крюке, ед.

При определении буксования с использованием приемника GNSS по методу точечного позиционирования, т.е. посредством измерения фактически пройденного пути, формула (5) примет вид

$$\delta_{PP} = \left(1 - \frac{S_{PP}}{n_{e(S)} \cdot k'_S}\right) \cdot 10^2, \quad (13)$$

где S_{PP} – фактический путь, пройденный трактором, м;

$n_{e(S)}$ – количество оборотов, совершенных коленчатым валом двигателя при прохождении пути S_{PP} , ед.;

k'_S – коэффициент, получаемый отношением фактического пути, пройденного трактором к количеству оборотов коленчатого вала двигателя при том же передаточном отношении трансмиссии и движении трактора без нагрузки (с нулевым буксованием).

В данном случае, буксование является косвенной величиной, определяемой независимо измеряемыми величинами S_{PP} и $n_{e(S)}$, а результирующая погрешность рассчитывается по формуле

$$\Delta\delta_{PP} = \sqrt{\left(\frac{10^2}{k'_S \cdot \bar{n}_{e(S)}} \cdot \Delta S_{PP}\right)^2 + \left(\frac{\bar{S}_{PP} \cdot 10^2}{k'_S \cdot \bar{n}_{e(S)}^2} \cdot \Delta n_{e(S)}\right)^2}, \quad (14)$$

где \bar{S}_{PP} и ΔS_{PP} – соответственно математическое ожидание и абсолютная погрешность измерения фактического пути, пройденного трактором, м;

$\bar{n}_{e(S)}$ и $\Delta n_{e(S)}$ – соответственно математическое ожидание и абсолютная погрешность измерения количества оборотов, совершенных коленчатым валом двигателя при прохождении пути S_{PP} , ед.

При определении буксования с использованием приемника GNSS по методу прямого измерения фактической скорости, основанному на эффекте Доплера, формула (5) примет вид

$$\delta_{DM} = \left(1 - \frac{v_{\text{факт}} \cdot t}{n_{e(t)} \cdot k'} \right) \cdot 10^2, \quad (15)$$

где t – длительность интервала измерений, с;

$n_{e(t)}$ – количество оборотов, совершенных коленчатым валом двигателя за интервал времени t , ед.

В данном случае, буксование является косвенной величиной, определяемой тремя независимо измеряемыми величинами ($v_{\text{факт}}$, $n_{e(t)}$ и t) и значение результирующей погрешности $\Delta\delta_{DM}$, % будет определяться по формуле

$$\Delta\delta_{DM} = \sqrt{\left(\frac{\bar{t} \cdot 10^2}{k' \cdot \bar{n}_{e(t)}} \cdot \Delta v_{\text{факт}} \right)^2 + \left(\frac{\bar{t} \cdot \bar{v}_{\text{факт}} \cdot 10^2}{k' \cdot \bar{n}_{e(t)}^2} \cdot \Delta n_{e(t)} \right)^2 + \left(\frac{\bar{v}_{\text{факт}} \cdot 10^2}{k' \cdot \bar{n}_{e(t)}} \cdot \Delta t \right)^2}, \quad (16)$$

где $\bar{v}_{\text{факт}}$ и $\Delta v_{\text{факт}}$ – соответственно математическое ожидание и абсолютная погрешность измерения фактической скорости трактора, м/с;

$\bar{n}_{e(t)}$ и $\Delta n_{e(t)}$ – соответственно математическое ожидание и абсолютная погрешность измерения количества оборотов, совершенных коленчатым валом двигателя за интервал времени t , ед;

\bar{t} и Δt – соответственно математическое ожидание и абсолютная погрешность измерения длительности интервала времени t , с.

Для сравнения точности определения буксования по рассмотренным трем методам, формулы (12), (14) и (16) удобно представить в виде функции одного аргумента – пути S , пройденного трактором при измерении. Формула (12) примет вид

$$\Delta\delta_{ISO}(S) = \sqrt{\left(\frac{10^2}{\bar{n}_K(S)} \cdot \Delta n'_K\right)^2 + \left(\frac{\bar{n}'_K(S) \cdot 10^2}{\bar{n}_K^2(S)} \cdot \Delta n_K\right)^2}, \quad (17)$$

где:

$$\bar{n}_K(S) = \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot R_K}, \quad (18)$$

$$\bar{n}'_K(S) = \frac{2 \cdot \bar{\delta} \cdot S}{2 \cdot \pi \cdot R_K}, \quad (19)$$

$\bar{\delta}$ – математическое ожидание буксования, %;

R_K – радиус качения колеса трактора, м.

Формула (14) примет вид

$$\Delta\delta_{PP}(S) = \sqrt{\left(\frac{10^2}{k'_S \cdot \bar{n}_{e(S)}(S)} \cdot \Delta S_{PP}\right)^2 + \left(\frac{S \cdot 10^2}{k'_S \cdot \bar{n}_{e(S)}(S)^2} \cdot \Delta n_{e(S)}\right)^2}, \quad (20)$$

где:

$$\bar{n}_{e(S)}(S) = \frac{S \cdot 10^2}{k'_S \cdot (\bar{\delta} - 10^2)}, \quad (21)$$

И формула (16) примет вид

$$\Delta\delta_{DM}(S) = \sqrt{\left(\frac{\bar{t}(S) \cdot 10^2}{k' \cdot \bar{n}_{e(t)}(S)} \cdot \Delta v_{fact}\right)^2 + \left(\frac{\bar{t}(S) \cdot \bar{v}_{fact} \cdot 10^2}{k' \cdot \bar{n}_{e(t)}(S)^2} \cdot \Delta n_{e(t)}\right)^2 + \left(\frac{\bar{v}_{fact} \cdot 10^2}{k' \cdot \bar{n}_{e(t)}(S)} \cdot \Delta t\right)^2}, \quad (22)$$

где:

$$\bar{t}(S) = \frac{S}{\bar{v}_{факт}}, \quad (23)$$

$$\bar{n}'_{e(t)}(S) = \frac{S}{k'}, \quad (24)$$

Графики функции $\Delta\delta_{ISO}(S)$, $\Delta\delta_{PP}(S)$ и $\Delta\delta_{DM}(S)$ при значениях $\Delta S = \pm 5$ м, $\Delta v_{факт} = \pm 0,02 \cdot v_{факт}$, $\Delta t = \pm 0,1$ с, $\Delta n_{e(S)} = \Delta n_{e(t)} = \pm 0,5$ об., буксовании $\bar{\delta} = 14$ % и коэффициенте $k' = k'_S = 0,0826$, соответствующем

движению трактора Versatile 2375, оборудованного радиальными шинами 30.5 R32 R1 на 3-й передаче среднего (Medium range) диапазона представлен на рисунке 5.

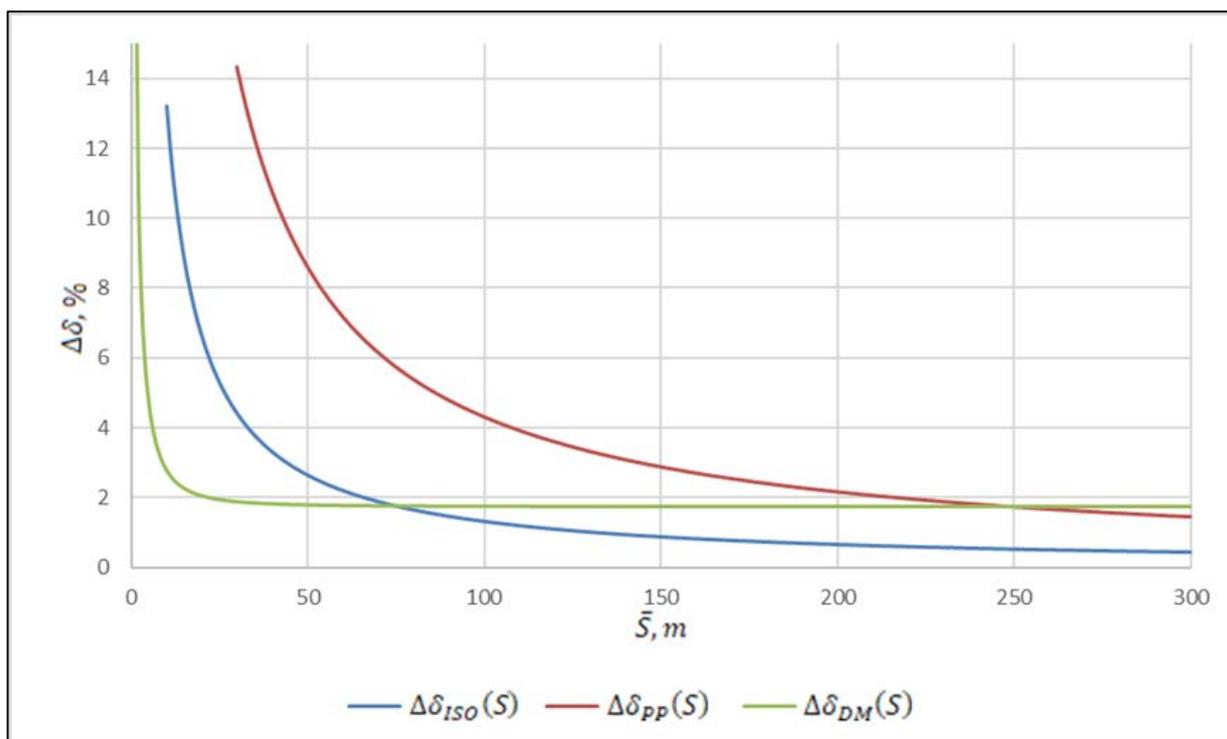


Рисунок 5 – Графики функции $\Delta\delta_{ISO}(S)$, $\Delta\delta_{PP}(S)$ и $\Delta\delta_{DM}(S)$

Из анализа полученных зависимостей (14) и (16) видно, при определении буксования с использованием метода точечного позиционирования, наибольшее влияние на результирующую точность измерения буксования, оказывает точность измерения пройденного пути ΔS , влияние же погрешности измерения количества оборотов коленчатого вала, даже при значении $\Delta n_{e(S)} = \pm 0,5$, что соответствует одной отметке измерителя на оборот, пренебрежимо мало. Для повышения точности, следует увеличивать интервал измерения \bar{S} . При определении буксования методом прямых измерений фактической скорости, с увеличением длительности интервала измерения, погрешность определения буксования асимптотически снижается и, при достаточно больших t , основной вклад в результирующее значение погрешности измерения буксования, будет вносить $\Delta v_{\text{факт}}$, а при снижении t , наоборот, гиперболически возрастает влияние точности измерения количества оборотов коленчатого вала. Это связано с

принципом измерения, основанном на эффекте Доплера, позволяющем рассчитывать значения скорости движения приемника GNSS, близкие к мгновенным.

На рисунке 5 видно, что на коротких интервалах, наиболее точным является метод измерения, основанный на прямом измерении фактической скорости приемником GNSS. При заданных условиях, уже при интервале измерений $\bar{S} = 33$ м, достигается точность, для которой при методе, соответствующем ISO 789-9, потребуется интервал 72 м, а при методе точечного позиционирования – 205 м. Однако, при дальнейшем увеличении интервала измерений, наибольшей точностью, недостижимой для методов с использованием одностотных приемников GNSS, является стандартный метод определения буксования.

4 Разработка метода расчета балластировки трактора

Для определения необходимого сцепного веса, производителями тракторов и исследователями, рекомендуется алгоритм, который в общем виде выглядит следующим образом:

- нанести метки на ведущее колесо трактора и измерить длину его окружности;
- отмерить и отметить на поле достаточное расстояние;
- выполнить работу, одновременно подсчитывая количество оборотов колеса на отмеченном участке поля;
- рассчитать буксование колес, как отношение произведения длины окружности колеса на количество его оборотов к длине отмеченного участка;
- в зависимости от полученного значения буксования увеличить или уменьшить вес трактора;
- повторять процедуру до получения необходимых значений буксования.

При этом, рекомендаций по расчету величины, на которую необходимо изменить вес трактора не предоставляется, а широкое применение расчетных зависимостей (7), (8), (9) и аналогичных, представляет значительные затруднения для применения в обычных условиях эксплуатации.

Кроме того, если представить (в общем случае) зависимость буксования трактора от его веса для конкретного вида работ в виде

$$Slip_i = f(DrawPul_i, Wight_i, k_{td}, k_s), \quad (25)$$

где k_{td} – эмпирический коэффициент, характеризующий конструкцию трактора;

k_s – эмпирический коэффициент, характеризующий сцепные качества почвы;

то становится видно, что наличие в формуле (25) коэффициентов k_{td} и k_s повышает степень неопределенности результата изменения веса трактора и ведет к увеличению количества итераций описанной выше процедуры, для достижения желаемого результата.

Таким образом, становится актуальным вопрос разработки подходов,

позволяющих, на основании имеющейся информации о буксовании трактора, максимально точно рассчитать необходимый для данных условий и вида работ вес трактора.

При решении прикладной задачи расчета необходимого изменения веса $DeltaWight$, %, для конкретного вида работы, можно представить формулу (25) в виде

$$DeltaWight_i = f(DeltaSlip_i Wight_i, k_{td}), \quad (26)$$

где $DeltaSlip_i$ – целевое изменение буксования, необходимое для достижения оптимальных значений, %.

Таким образом исключается необходимость учета тягового сопротивления, оказываемого орудием $DrawPull_i$ и характеристик опорной поверхности (почвы) k_s . Это можно считать допустимым, поскольку результат решения задачи будет распространяться на те же условия, в которых были получены исходные данные.

Следовательно, единственным неопределенным фактором, оказывающим влияние на успешное решение задачи, остается k_{td} , однако, имея достаточный набор сопоставимых экспериментальных данных, можно попытаться получить некую опорную математическую модель, позволяющую с наибольшей вероятностью, после первой итерации получить ожидаемый результат.

Для достижения поставленной цели, в исследовании применялся метод математического моделирования буксования тракторов с использованием результатов испытаний, проведенных в соответствии с кодексом 2 OECD (Testing of agricultural and forestry tractor performance) [29] в испытательной лаборатории Nebraska Tractor Test Laboratory (NTTL). Были проанализированы 1264 отчета об испытаниях, проведенных за период с 2000 г. по настоящее время [30]. Из этих отчетов, для дальнейшего использования и обработки, были отобраны отчеты об испытаниях 78 моделей колесных тракторов, содержащие информацию о результатах тяговых испытаний как в базовой комплектации (без балласта), так и с максимальным, предусмотренным производителем, балластом.

На рисунке 6 представлены экспериментальные значения буксования колесных тракторов в зависимости от тягового усилия на крюке на бетонном треке. Для возможности сопоставления существенно различающихся по мощности моделей, тяговое усилие представлено в виде относительных единиц, при этом за 100 % принято максимальное тяговое усилие каждого трактора, полученное при проведении испытаний без балласта.

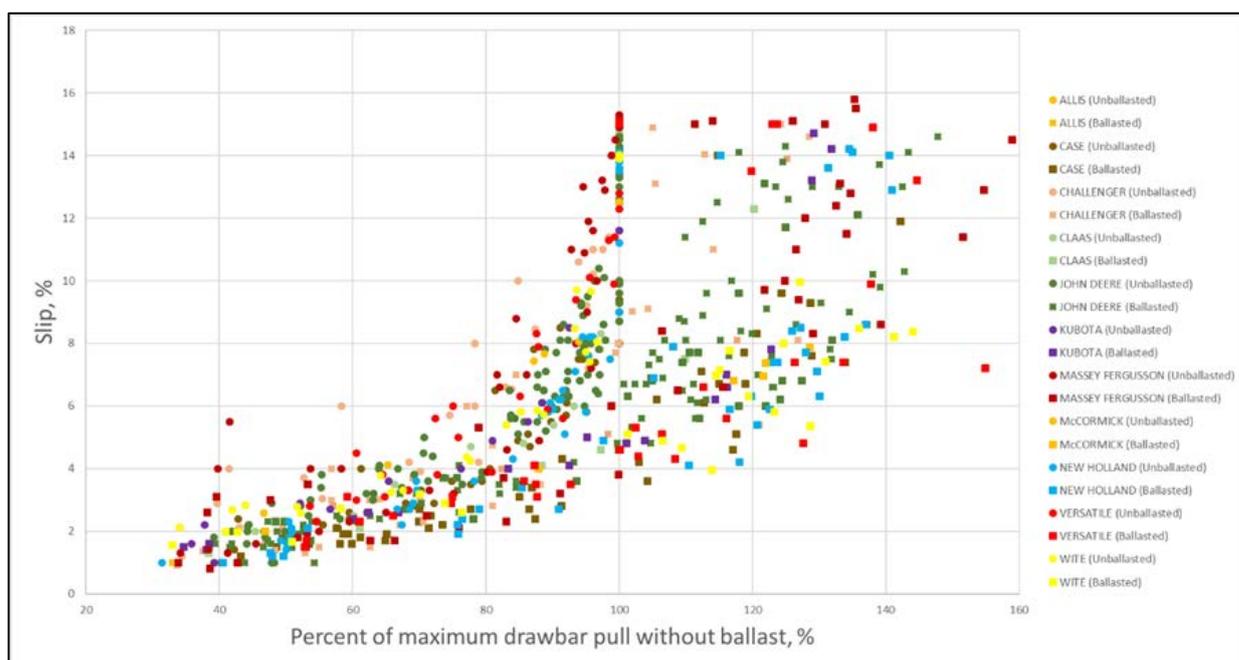


Рисунок 6 – Экспериментальные значения буксования в зависимости от тягового усилия, выраженного в процентах от максимального тягового усилия без балласта на бетонном треке

На следующем этапе, для каждой модели трактора, методом непараметрической регрессии LOESS [24]-[28], были построены математические модели буксования в виде функции тягового усилия и рассчитаны распределения изменения буксования $\Delta Slip_i$ при относительном изменении веса трактора $\Delta Wight$ для различных уровней тягового усилия. Плотности распределения $\Delta Wight$ и $\Delta Slip_i$ для уровней тягового усилия, соответствующих максимальной тяговой мощности и максимальному тяговому усилию, ограниченному буксованием без балласта, представлены на рисунке 7.

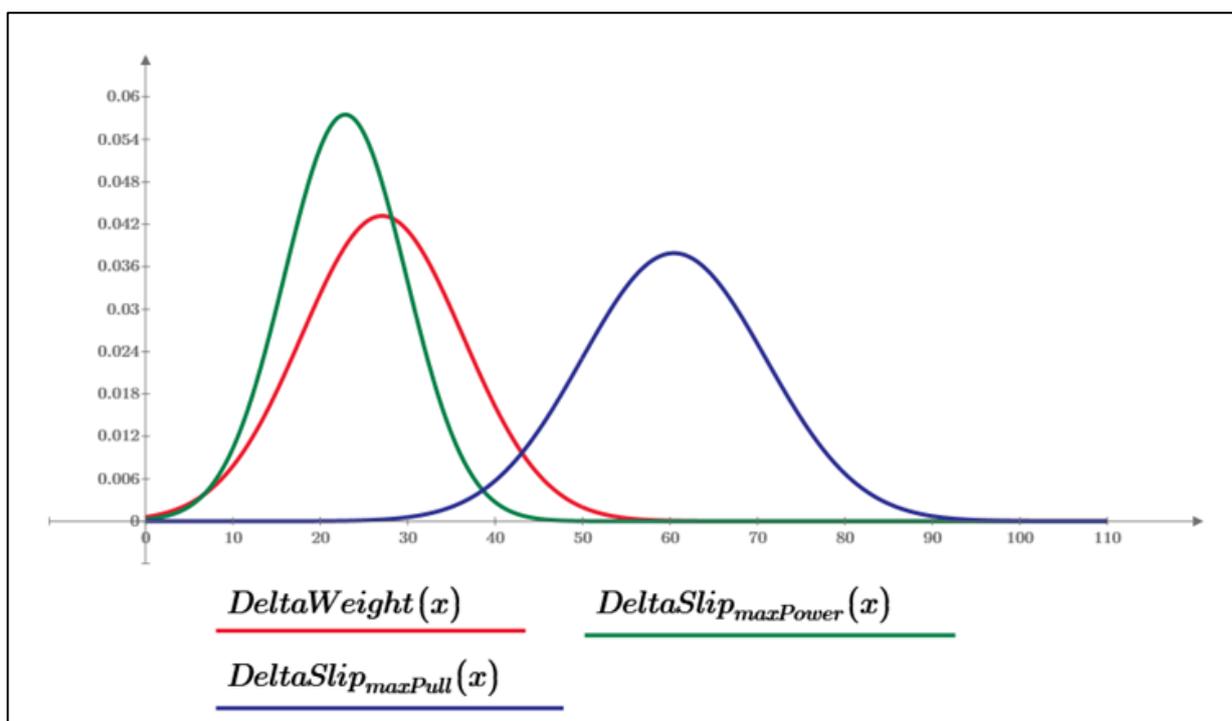


Рисунок 7 – Плотность распределения $\Delta Wight$ and $\Delta Slip_i$ при уровнях тягового усилия, соответствующих максимальной тяговой мощности и максимальному тяговому усилию

По результатам полученных распределений стало возможным построить регрессионные модели буксования «усредненного» колесного трактора при коэффициенте изменения сцепного веса $\Delta Wight = 28,38\%$ на бетонном треке.

Тяговые характеристики тракторов, определенные на бетонном треке, обладают ключевым, на начальном этапе решения поставленной задачи, свойством постоянства сцепных качеств опорной поверхности, однако для практического применения в обычной эксплуатации, следует провести пересчет измеренных показателей для соответствия характерному почвенному фону.

Для моделирования переходных функций использовались следующие допущения:

- усредненный коэффициент сцепления с опорным основанием принят: 0,9 для бетонного трека, 0,6 для стерни пшеницы и 0,5 для пашни;
- уровень буксования при максимальной мощности от 14 % до 16 %, при максимальном тяговом усилии от 25 % до 35 %;

- тяговое усилие при максимальной мощности, находится в окрестности $Wight \cdot 3,92 \cdot 10^{-3}$;

- относительное соотношение тягового усилия при максимальной мощности и максимальным тяговым усилием сохраняется.

Далее, после аппроксимации расчетных данных по каждой модели трактора и определения характеристик распределения опорных значений, были получены регрессионные модели буксования «усредненного» колесного трактора на стерне озимой пшеницы и пашне. Регрессионные модели на всех трех типах треков представлены на рисунке 8.

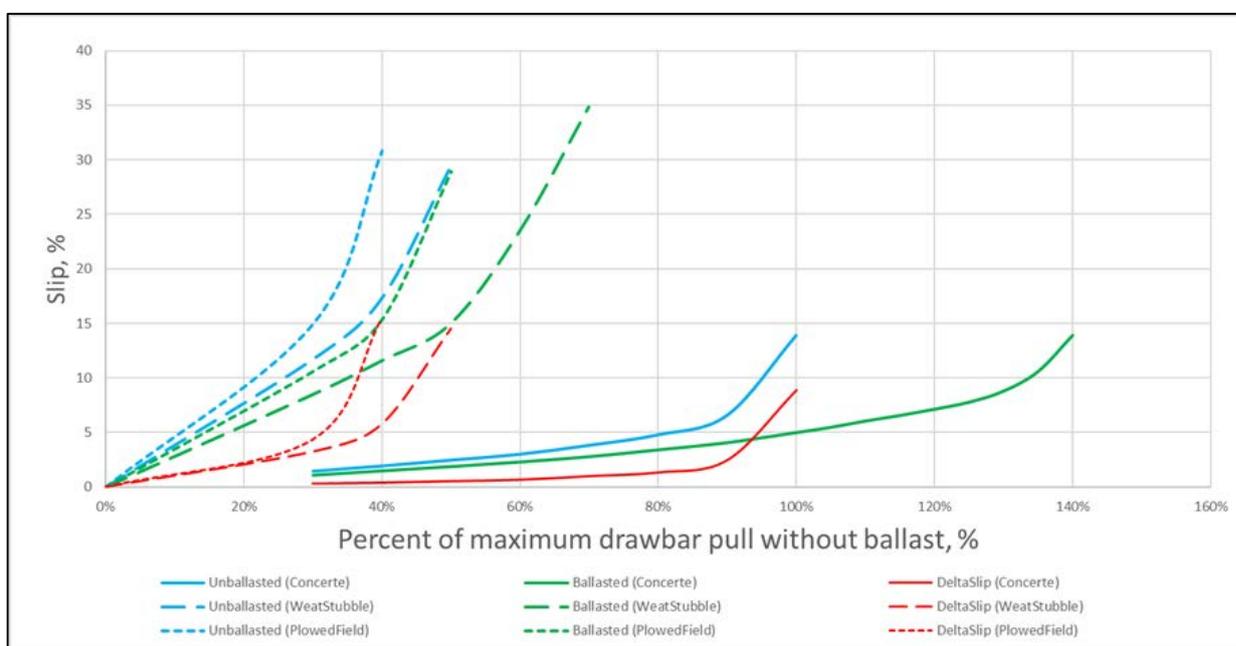


Рисунок 8 – Буксование как функция тягового усилия, выраженного в процентах от максимального тягового усилия без балласта на бетонном треке

Из рисунка 8 видно, что при фиксированных изменениях веса трактора ($DeltaWight = const$), изменение буксования происходит нелинейно и зависит от тягового усилия. Поскольку при постановке задачи, в формуле (26), мы избавились от параметра $DrawPull_i$, удобно представить $DeltaSlip_i$ в виде функции исходного (измеренного) буксования (рисунок 9). На рисунке 9 хорошо видно, что функция $DeltaSlip = f(Slip)$ практически не отличается для рассмотренных почвенных треков и, при $DeltaWeight = 28,38$, достаточно точно линеаризуется системой

$$\left. \begin{aligned} \Delta Slip &= 0,2913 \cdot Slip, & Slip \in (0; 15] \\ \Delta Slip &= 0,6996 \cdot Slip - 6,0834, & Slip \in [15; 30) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

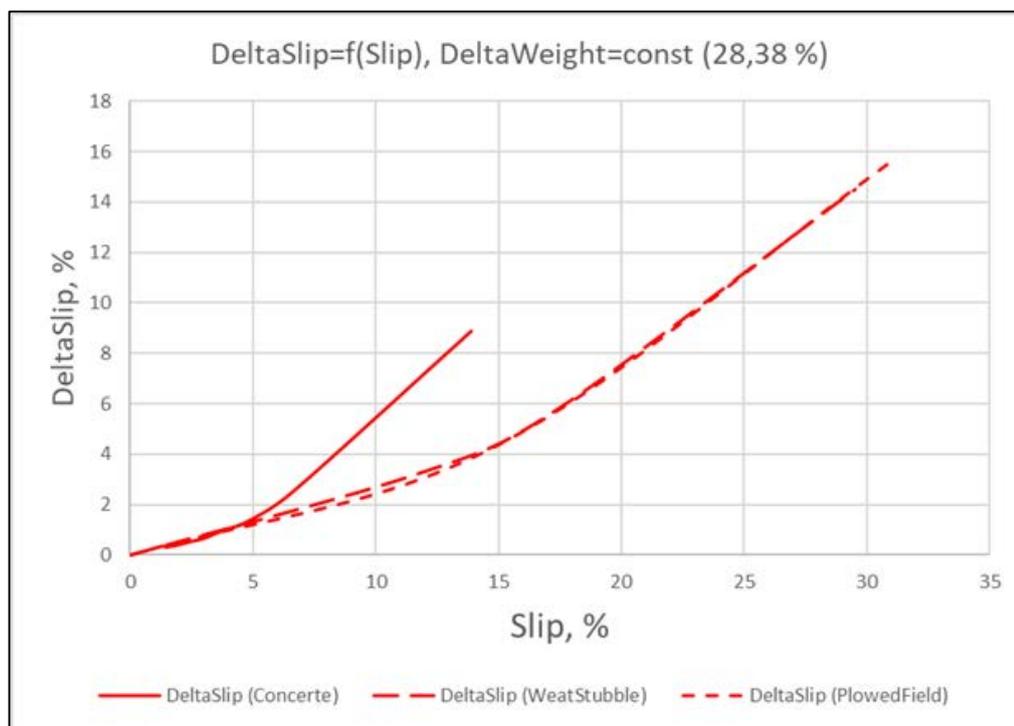


Рисунок 9 – $\Delta Slip$ в виде функции измеренного буксования

Принимая, что для фиксированных значений исходного (измеренного) буксования, необходимое изменение сцепного веса трактора будет пропорционально целевому изменению буксования $\Delta Slip$, на основании имеющихся данных, получена зависимость

$$\Delta Weight(Slip, \Delta Slip) = (10,95 - 0,3 \cdot Slip) \cdot \Delta Slip, \quad (28)$$

График зависимости, приведенной в формуле (28), изображен на рисунке 10.

Поскольку на практике ставится задача достижения оптимального значения буксования 15 %, формулу (28) можно представить в виде простой функции одной переменной

$$\Delta Weight(Slip) = 15,45 \cdot Slip - 0,3 \cdot Slip^2 - 164,25, \quad (29)$$

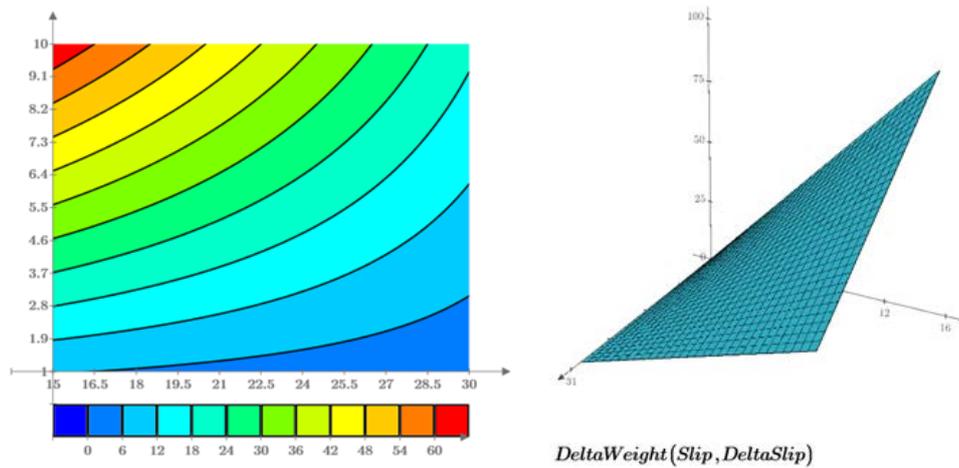


Рисунок 10 – $\Delta Weight$ в виде функции буксования и $\Delta Slip$

В результате проведенного исследования, получены две математические модели, позволяющие на основании измеренного значения буксования колес трактора, с вероятностью 0,7 рассчитать вес излишнего (либо необходимого) балласта.

5 Экспериментальные исследования

5.1 Методика экспериментальных исследований

Для проверки работоспособности нового метода определения буксования движителей трактора с помощью одночастотного приемника GNSS в программу полевых испытаний включены следующие этапы:

- экспериментальная оценка буксования движителей трактора посредством определения теоретической скорости движения измерением количества оборотов коленчатого вала двигателя, а фактической скорости движения – методом доплеровских измерений с помощью одночастотного приемника GNSS;
- сравнительная оценка результатов определения буксования движителей трактора по предлагаемому и известным методам;
- оценка возможности применения нового метода определения буксования движителей трактора в условиях реальной эксплуатации.

Место проведения исследований – валидационный полигон Новокубанского филиала ФГБНУ «Росинформагротех» (КубНИИТиМ).

Для реализации поставленных в программе исследований задач необходимо разработать и изготовить:

- устройство измерения теоретической скорости движения трактора методом измерения количества оборотов коленчатого вала двигателя;
- устройство измерения количества оборотов ведущих колес трактора в соответствии с ISO 789-9;
- устройство измерения фактической скорости движения трактора с помощью одночастотного приемника GNSS;
- измерительно-регистрирующую аппаратуру, обеспечивающую прием, сигналов с первичных преобразователей;
- специализированное программное обеспечение для обработки и сохранения информации, поступающей от первичных преобразователей и измерительно-регистрирующей аппаратуры;

- оборудовать трактор устройствами для определения теоретической и фактической скорости движения трактора и измерительно-регистрирующей аппаратурой и провести измерения во время выполнения технологической операции.

5.2 Разработка устройства определения буксования

Для определения теоретической скорости движения трактора по новому методу, разработка каких-либо датчиков не требуется. Количество оборотов коленчатого вала двигателя возможно определить прямо, используя сигнал штатного индукционного датчика частоты вращения коленчатого вала, либо косвенно, измеряя невыпрямленное напряжение на одной из фазовых обмоток электрического генератора (рисунок 11).

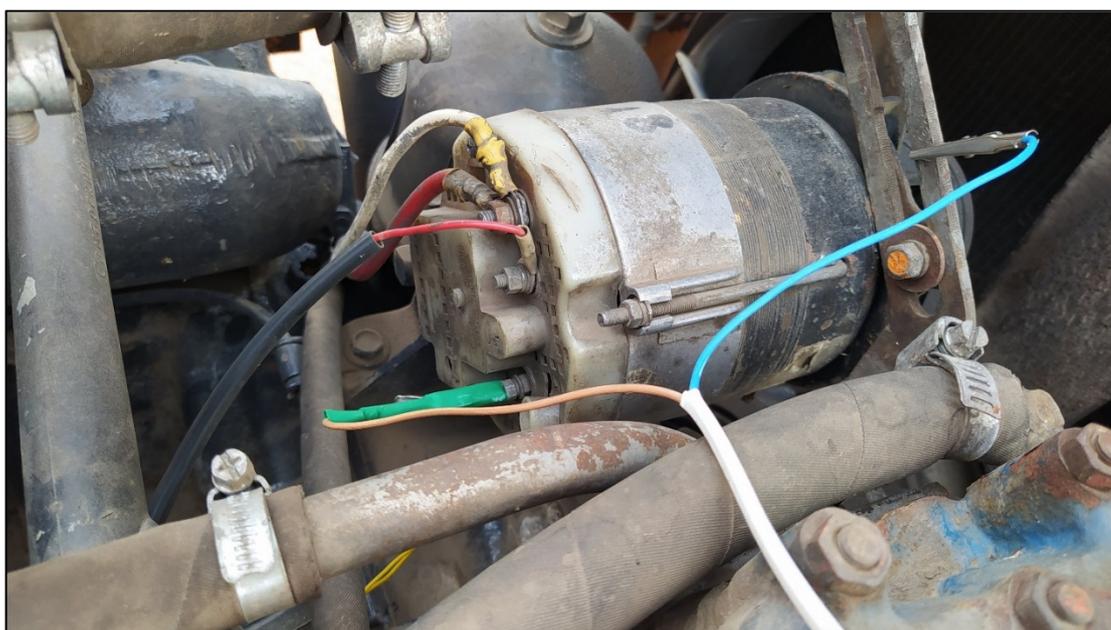


Рисунок 11 – Подключение к фазовой обмотке электрического генератора двигателя ЯМЗ-238НД трактора К-700А

Дополнительно, была предусмотрена возможность измерения количества оборотов двигателя трактора с помощью пьезоэлектрических датчиков, монтируемых на топливопровод высокого давления, ведущий к любой из форсунок двигателя (рисунок 12).

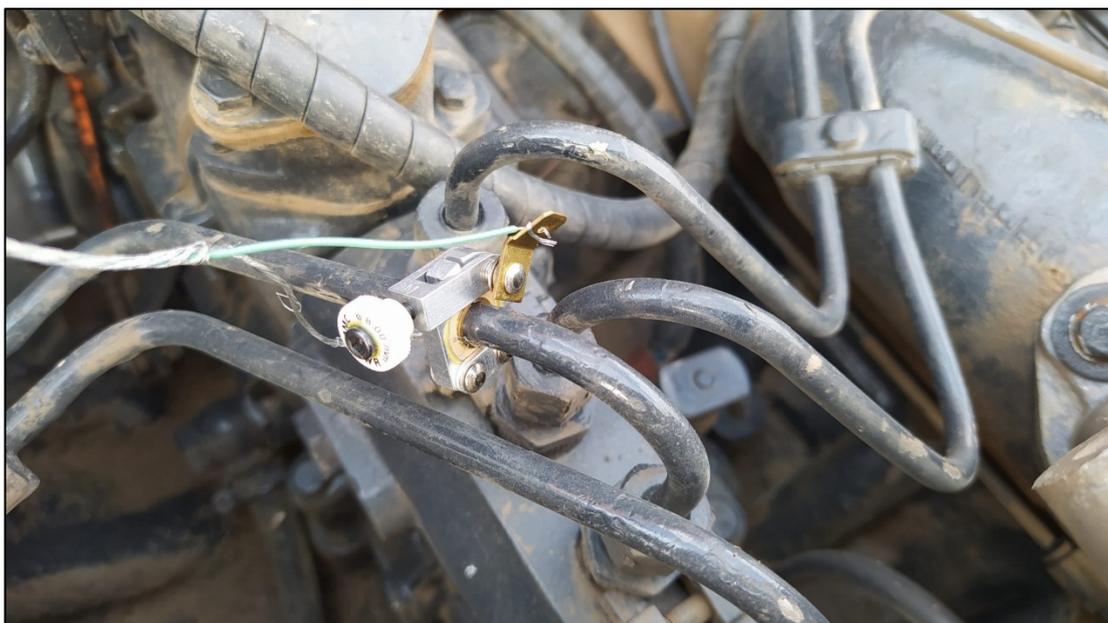


Рисунок 12 – Установка пьезоэлектрического датчика на топливопровод высокого давления двигателя ЯМЗ-238НД трактора К-700А

Для определения количества оборотов ведущих колес трактора по ISO 789-9, использовались беспроводные датчики буксования ИП-291, разработанные КубНИИТиМ (рисунок 13).

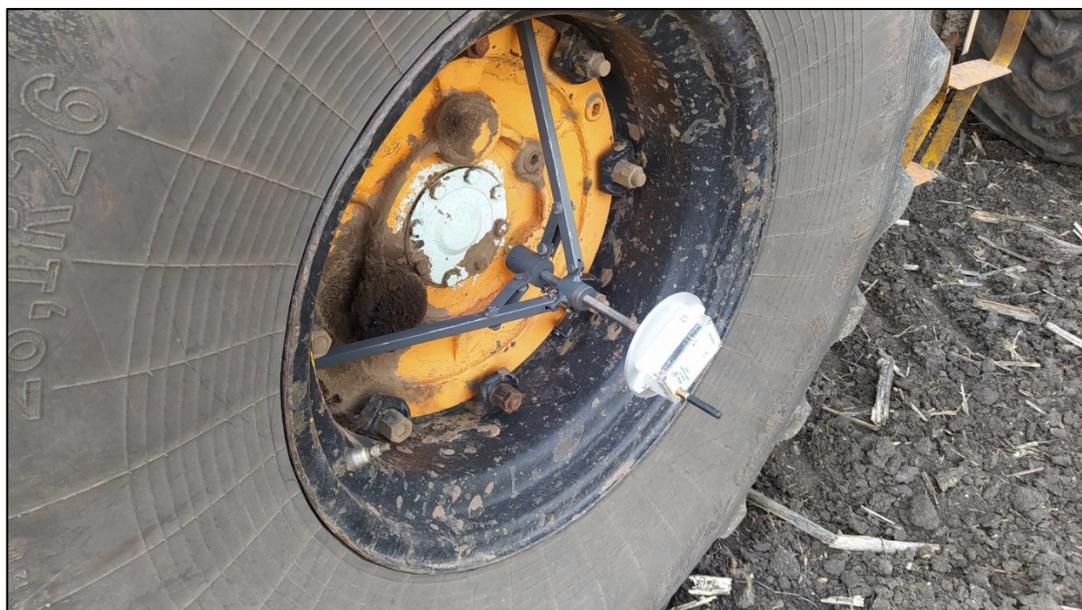
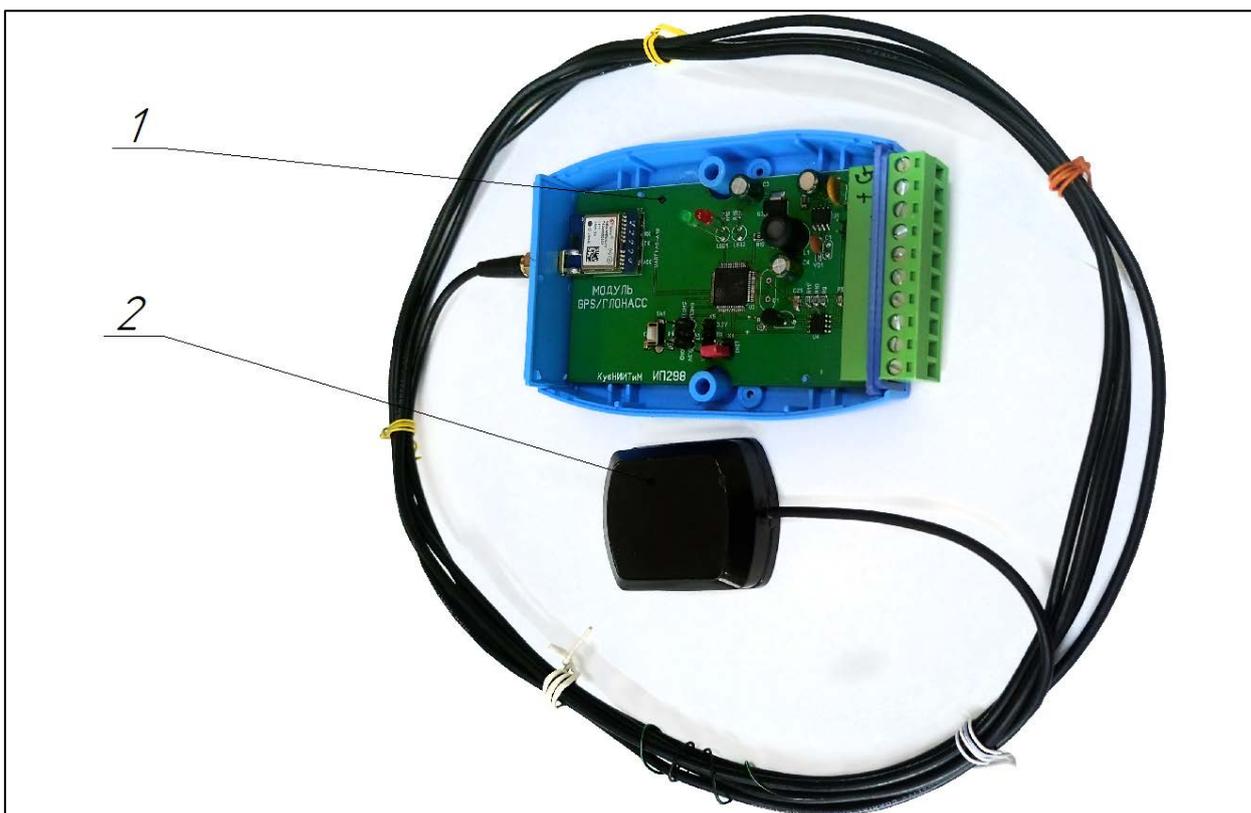


Рисунок 13 – Установка беспроводного датчика буксования ИП-291 на ведущее колесо трактора К-700А

Для определения фактической скорости движения разработан одностотный модуль-приемник GNSS ИП-298 (рисунок 14).



1 – модуль ИП-298; 2 – антенна GPS-ГЛОПАСС

Рисунок 14 – Одночастотный модуль-приемник GNSS ИП-298

5.3 Измерительно-регистрающая аппаратура и программное обеспечение

Для организации приема данных от датчиков, применялась измерительная информационная система ИП-264 [31], [32] разработки КубНИИТиМ (рисунок 15).

Система ИП-264 обеспечивает прием дискретных и аналоговых сигналов от различных типов первичных преобразователей.

Система отличается компактными размерами, широким диапазоном напряжения питания и мощным программным обеспечением, работающем в среде Windows. Связь между электронным измерительным блоком и компьютером осуществляется через USB-интерфейс.

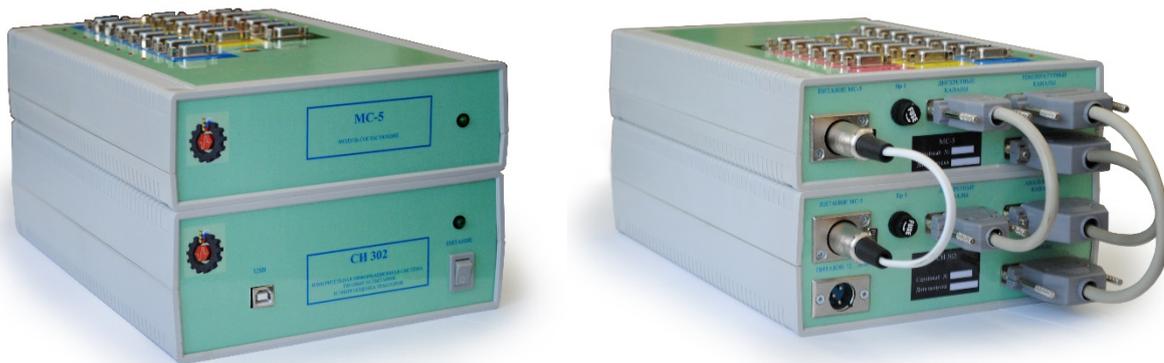


Рисунок 15 – Измерительная информационная система ИП-264

Также система была оборудована модулем беспроводной связи ИП-294 для подключения беспроводных датчиков буксования ИП-291.

В состав системы входит ноутбук с программным обеспечением «Исследователь».

Программа «Исследователь» (рисунок 16) функционирует в среде "Windows XP/Vista/7/8" и предназначена для реализации функциональных возможностей измерительной информационной системы ИП-264.



Рисунок 16 – Окно проведения опыта при измерении тягового сопротивления

Программа может работать в следующих основных режимах:

1) режим проведения простых измерений сигналов по всем каналам с непрерывной регистрацией показателей в виде графиков;

2) режим проведения энергетической оценки сельскохозяйственных машин и тяговых испытаний тракторов в соответствии с действующими стандартами на методы испытаний.

Программа выполняет следующие основные функции:

1) производит конфигурирование функциональной схемы измерительных информационных систем ИП-264 и установку программируемых рабочих параметров;

2) производит измерение физических параметров, контролируемых входными первичными преобразователями;

3) отображает в реальном времени на виртуальных приборах и в виде графиков значения измеряемых и рассчитываемых физических величин;

4) осуществляет обработку и сохранение на жестком диске полученных от первичных преобразователей величин.

Данные хранятся в формате базы данных MS SQLServer с возможностью их передачи для обработки в другие программные среды (MS Excel, MS Word).

Настройки программы позволяют гибко менять минимальные и максимальные значения шкал виртуальных приборов, количество и размерность, отображаемых графиков значений тензометрических каналов.

Программа позволяет работать с подключаемой к компьютеру по USB-интерфейсу Web-камерой для визуального контроля оператором наиболее значимых зон испытываемой машины.

Программы написаны в среде Visual Studio 2010 и функционируют в операционных системах Windows 7/10.

Краткая техническая характеристика системы ИП-264 приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Краткая характеристика системы ИП-264

Наименование показателя	Значение показателя
Измерительная информационная система ИП-264	
Число входных каналов для тензодатчиков, шт. - питание тензомоста, В - ток питания тензомоста, мА, не менее - входное сопротивление, Мом - разрядность АЦП, бит - тип преобразования АЦП - частота преобразования АЦП, Гц - погрешность измерения, % Число температурных каналов, шт. - тип термопреобразователя сопротивления, подключение Число дискретных входов, шт. - тип дискретного входа - абсолютная погрешность измерения, имп. Контрольные индикаторы дискретных каналов Число дискретных выходов, шт. Интерфейс связи Напряжение питания системы, В Потребляемая мощность, Вт, не более Рабочие условия эксплуатации: - температура окружающей среды, °С Габаритные размеры, мм - блок электронный ИП-264 - устройство согласования Масса, кг, не более - блок электронный ИП-264 - устройство согласования	2 от 1 до 10 В 20 20 24 сигма-дельта 10 0,1 6 ГОСТ 6651-2009 [33] трехпроводное 8 TTL, открытый коллектор ± 1 имеются 1 USB 2.0 от 10 до 30 20 от +5 до +50 200×280×80 95×185×70 2,0 0,5
Персональный компьютер (входит в состав системы)	
Тип Количество Объем ОЗУ, Гбайт, не менее Рабочая частота процессора, ГГц, не менее Разрешение дисплея, пкс., не менее	ноутбук 1 2 1,5 1366×768
Программное обеспечение (входит в состав ИП-264)	
«Исследователь» Режимы работы программы - мониторинг каналов - тяговые испытания по ГОСТ Р 52777-2007 [1] Виртуальные приборы Отображение результатов в реальном времени Работа с USB-камерой	версия 5.6 и выше имеется имеется имеется имеется имеется

Для проведения экспериментальных исследований, был разработан специальный программный модуль к ПО «Исследователь», позволяющий ИИС ИП-264 работать с приемниками GNSS. Окно проведения опыта по определению буксования представлено на рисунке 17.

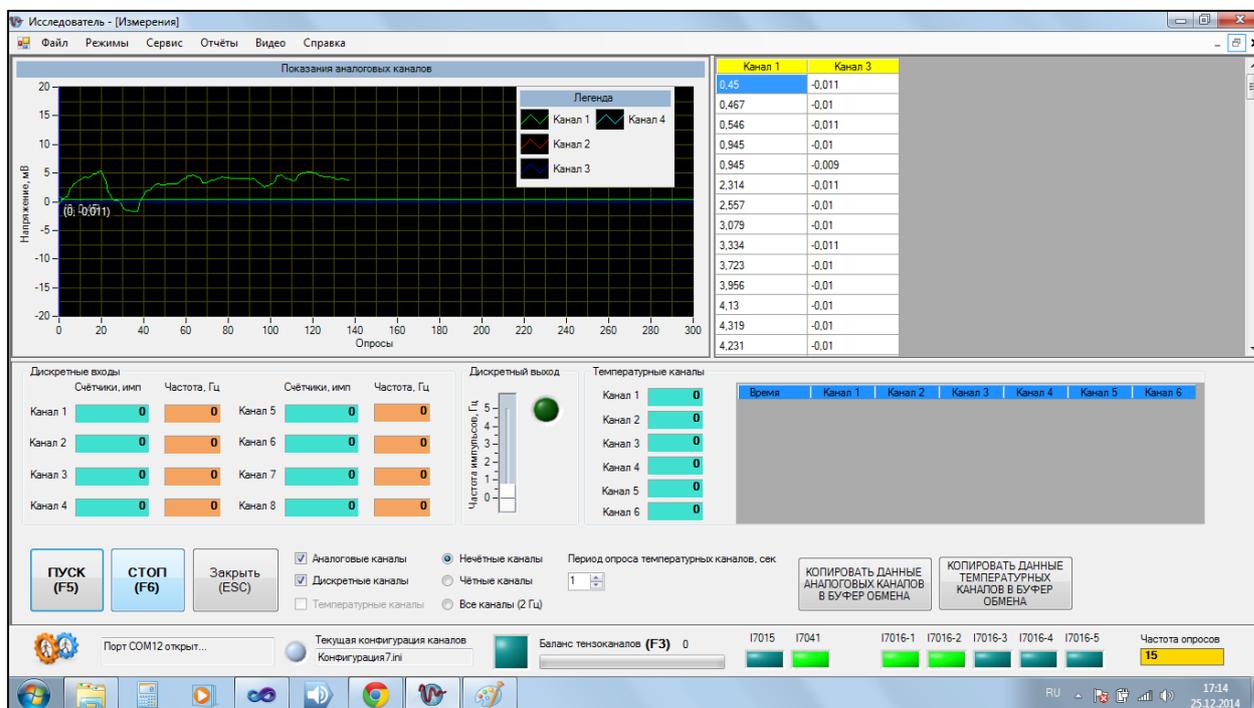


Рисунок 17 – Окно проведения опыта при измерении буксования

6 Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования нового метода определения буксования проводились при выполнении лущения стерни подсолнечника (второй проход) дисковой бороной КДК-9 в агрегате с трактором К-700А (рисунок 18). На тракторе были установлены шины 28,1R26, работа выполнялась на III диапазоне 2-й передачи.



Рисунок 18 – Подготовка агрегата К-700А+КДК-9 для проведения полевого эксперимента

Измерения проводились на отмеченном участке поля длиной 800 м. Первый проход совершался агрегатом с выглубленными рабочими органами (без тяговой нагрузки), и с небольшим смещением в сторону от обработанного участка (это было сделано для того, чтобы при рабочем проходе, колеса трактора двигались не по уплотненной колее). Второй проход (рабочий) совершался при выполнении технологического процесса. Пример трека, зарегистрированного в процессе полевого эксперимента приемником GNSS и преобразованного в формат *.kml представлен на рисунке 19.

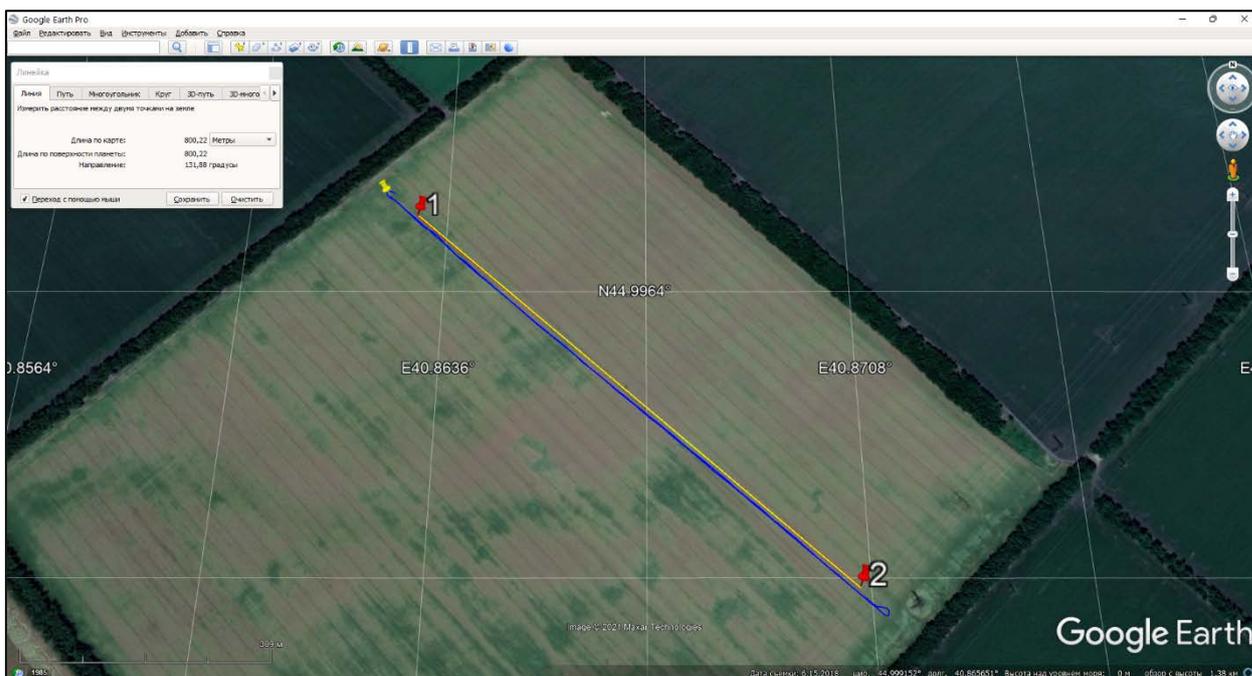


Рисунок 19 – Рабочий проход агрегата во время проведения полевого эксперимента

Во время первого прохода регистрировались с интервалом 100 м значения n'_{ki} для расчета буксования по формуле (2) и, с интервалом 1 с., значения $v'_{\text{факт}}$ и n'_e для расчета коэффициента k' по формуле (6).

Во время второго прохода, на тех же участках поля регистрировались значения n_{ki} для расчета буксования по формуле (2) и, с интервалом 1 с., значения $v_{\text{факт}}$ и n_e для расчета буксования по формулам (1) и (5).

На рисунке 20 представлена диаграмма значений фактической и теоретической скорости, полученных по новому методу определения буксования на зачетном участке прямолинейного движения протяженностью 800 м. На диаграмме видно, что первичные данные характеризуются существенным разбросом и наличием случайных выбросов (рисунки 21, 22). Поэтому, при дальнейшей обработке, первичные данные подвергались медианной фильтрации с размером плавающего окна 10 значений. Результаты также представлены на рисунке 20.

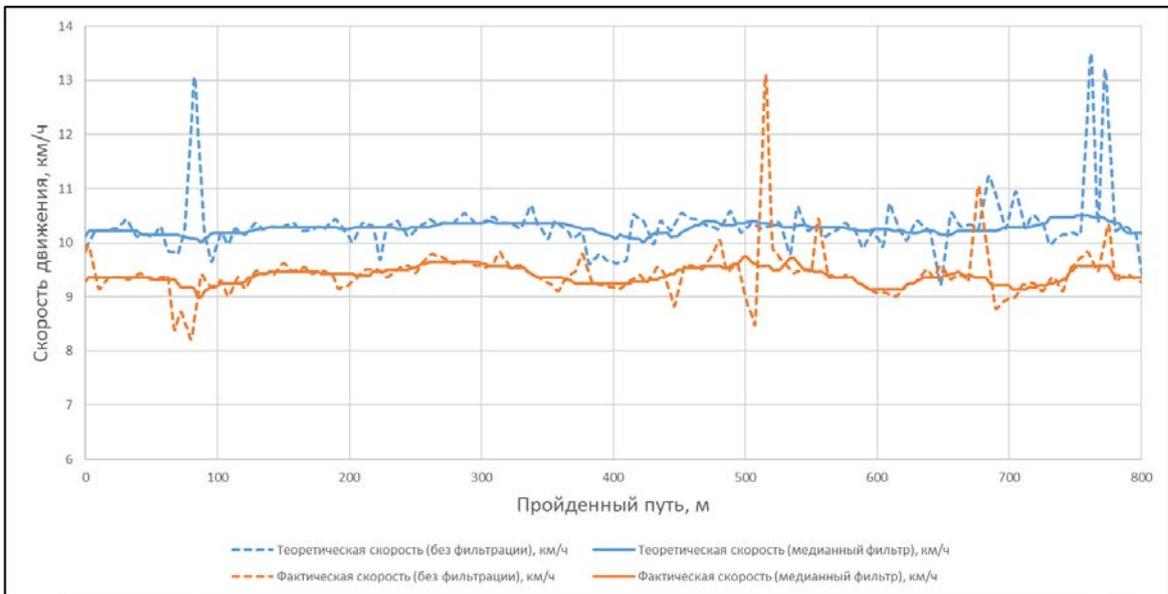


Рисунок 20 – Результаты определения теоретической и фактической скоростей движения агрегата

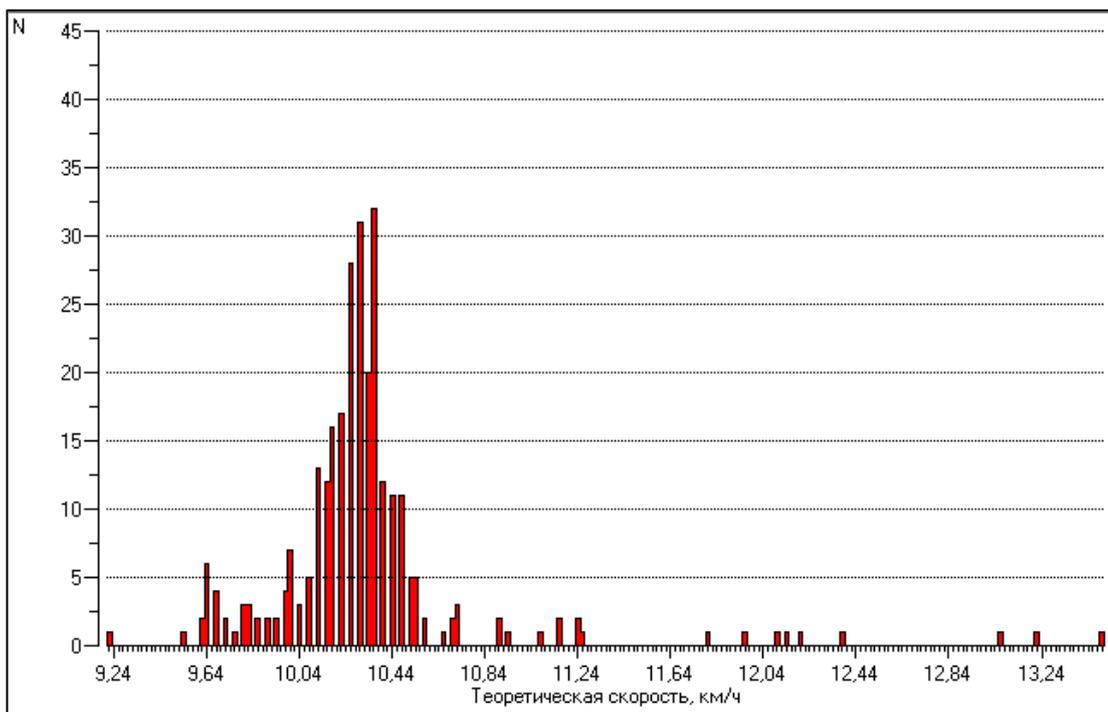


Рисунок 21 – Гистограмма распределения измеренных значений теоретической скорости

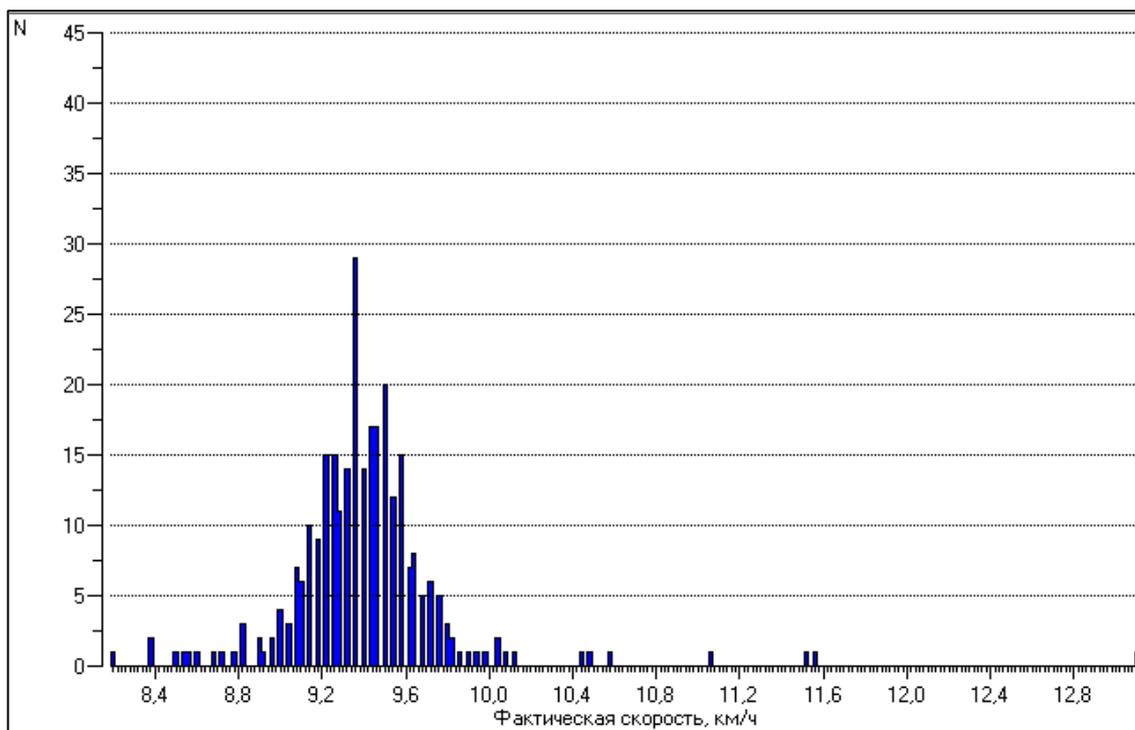


Рисунок 22 – Гистограмма распределения измеренных значений фактической скорости

Итоговые результаты обработки первичных данных и значения буксования трактора, определенные по новому методу и в соответствии с ISO 789-9, представлены на рисунке 23.

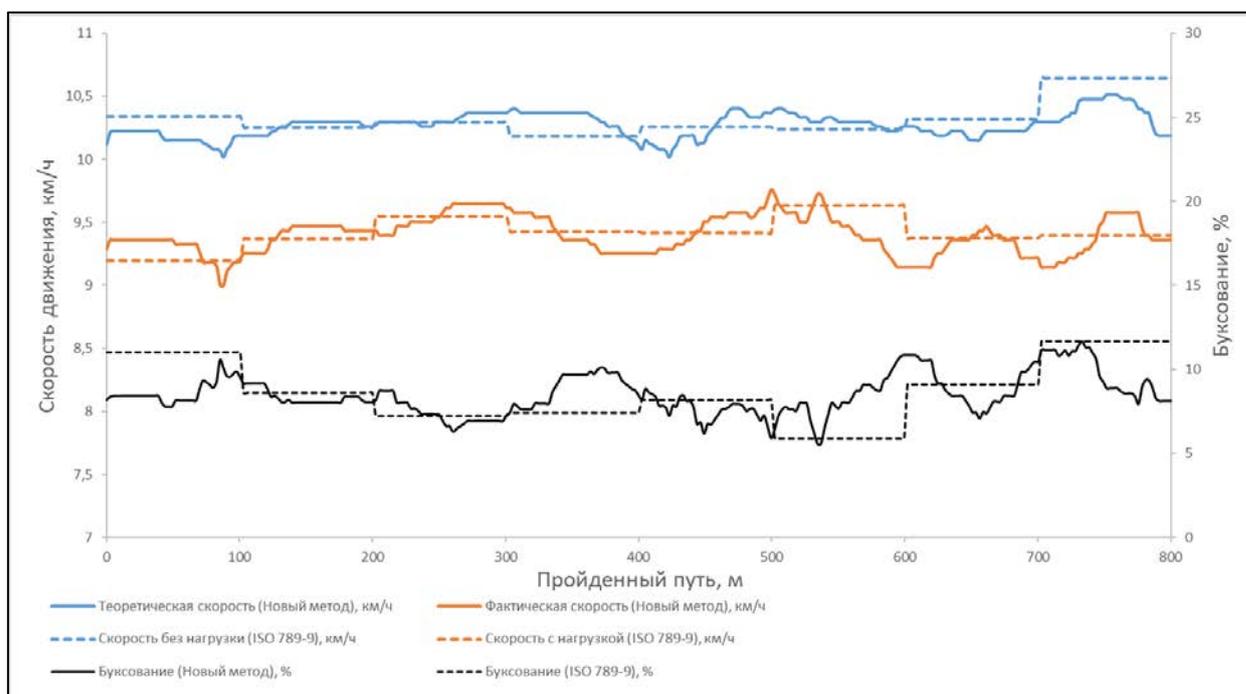


Рисунок 23 – Итоговые результаты определения буксования по методу ISO 789-9 и новому методу

По результатам экспериментальных исследований, можно сделать вывод о работоспособности разработанного метода определения буксования двигателей тракторов с применением одночастотных приемников GNSS и достаточной точности метода для применения в обычной эксплуатации.

В отличие от общепринятых методов, применение нового метода позволяет потребителю получать информацию о текущем буксовании трактора непосредственно при выполнении сельскохозяйственных операций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения НИР проанализированы современные методы и технические средства для оптимальной балластировки тракторов при работе машинотракторных агрегатов. Выделены их главные недостатки, такие как невозможность получения значений буксования в реальном режиме времени или высокая стоимость переоборудования энергосредства, кроме того, отсутствует методика, позволяющая рассчитать необходимое для конкретных условий, изменение сцепного веса трактора. Теоретически обоснован метод определения буксования движителей сельскохозяйственных тракторов, основанный на измерении частоты вращения коленчатого вала двигателя (либо элементов конструкции, имеющих с ним прозрачную кинематическую связь) и фактической скорости движения посредством одночастотных приемников ГНСС, который позволит получать информацию о соответствии сцепного веса трактора выполняемой сельскохозяйственной операции в реальном режиме времени. Разработан метод, позволяющий на основании полученной информации рассчитать и установить наиболее оптимальный вес балласта на трактор.

В результате выполнения НИР:

- разработан новый метод математического моделирования тяговых параметров сельскохозяйственных тракторов посредством непараметрической регрессии отрезками полиномов (LOESS);
- разработана математическая модель для оценки неопределенности измерения буксования тракторов различными методами;
- разработан метод определения текущего буксования сельскохозяйственных тракторов при выполнении сельскохозяйственных операций в режиме обычной эксплуатации;
- разработаны метрологические требования к оборудованию для определения текущего буксования сельскохозяйственных тракторов при выполнении сельскохозяйственных операций в режиме обычной эксплуатации;

- разработана математическая модель, позволяющая рассчитать необходимое изменение сцепного веса трактора на основании данных о текущем буксовании;

- проведены полевые исследования разработанных методов.

По результатам полевых исследований установлена работоспособность нового метода оптимизации балластировки трактора путем определения буксования колес с помощью элементов спутниковой навигации.

Результаты НИР будут способствовать сокращению расхода топлива и оптимизации режимов работы энергосредства во время проведения сельскохозяйственных операций во исполнение постановления № 740 и ведомственного проекта «Цифровое сельское хозяйство».

Рекомендуется продолжить развитие предложенного метода с целью доведения его до сельхозтоваропроизводителя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Ксенович И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система – почва – урожай. М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.
- 2 Анискин В. И., Антышев Н. М., Бычков Н. И. Концепция развития сельскохозяйственных тракторов и тракторного парка России на период до 2010г. – М.: ВИМ, 2002. – 51 с.
- 3 Бойков В. П., Белковский В. М. и др. Состояние и перспективы развития работ по тракторным шинам. – М.: ЦНИИТЭИ тракторсельхозмаш, 1983. – № 5. – С. 1–61.
- 4 Terra – Rejfen and Bodendruck. Isense Edmund. “Land technik”, 1985, 40. – № 9.
- 5 Arvidsson J, Hekansson I 2014 Response of different crops to soil compaction Shortterm effects in Swedish field experiments. Soil & Tillage Research 138. – 56–63.
- 6 Revenko V YU, Frolov S S, Tkachenko A N and Ivanov A B 2021 Refined method for determining the current agricultural machinery tire wearing surface area. Machinery and Equipment for Rural Area 289. – 10–15.
- 7 Schjinning P et. al. 2015 Predicted tyre-soil interface area and vertical stress distribution based on load-ing characteristics. Soil & Tillage Research 152. – 52–66.
- 8 Пупонин А. И., Матюк Н. С. Депрессия урожая сельскохозяйственных культур при уплотнении почвы и приемы ее снижения. – Сб. науч. тр. ВИМ, Т. 118. – 1988. – С. 75–86.
- 9 Проблема воздействия на почву и эффективные направления ее решения. Тезисы докладов Международной научно-практической конференции. – М.: ВИМ, 1998. – С. 78–92.
- 10 Ксенович И. П. Внедорожные тягово-транспортные системы: проблемы защиты окружающей среды // Тракторы и сельхозмашины. – 1996. – № 6. – С. 18–22.

11 Der neue Standart-Radialreifen für die Landwirtschaft: Continental: Bereifung für die Landwirtschaft. "Schweiz. Landtechn. 2000, 62. – № 9. – 7.

12 Русанов В. А. Проблемы переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения. – М.: ВИМ, 1998. – 368 с.

13 Коптев В. В., Шкарлет В. Г., Яровой В. Г., Оберемок В. А. Повышение тяговой эффективности колесных движителей сельскохозяйственных тракторов // Тракторы и сельхозмашины. – 1989. – № 6. – С. 45–46.

14 Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning / T. Keller [et al.] // Soil & Tillage Research. 2019. V. 194. Pp. 1–12.

15 Кузнецов Н.Г., Гапич Д.С., Ширяева Е.В. К вопросу об определении допустимого коэффициента буксования полноприводного колесного трактора // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2014. – № 2 (34). – С. 176–179.

16 Венглинский А.М. Контроль буксования колесных тракторов МТЗ при возделывании сельскохозяйственных культур // Улучшение эксплуатационных показателей с.-х. энергетики: Материалы IV междунар. науч.-практ. конф. «Наука – технология – ресурсосбережение». / Киров: Издательство Вятская ГСХА, 2011. – С. 10–12.

17 Jarosław P 2005 Effects of repeated rolling of agricultural tractors on soil stress and deformation state in sand and loess. Soil Tillage Res 82:77–88.

18 Wong J Y, McLaughlin N B, Knezevic Z and Burt S 1998 Optimization of the tractive performance of four-wheel-drive tractors: Theoretical analysis and experimental substantiation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 212, 285–297.

19 Staton M Improving Tractor Performance and Fuel Efficiency [электронный ресурс] – URL: <https://www.canr.msu.edu/resources/improving-tractor-performance-and-fuel-efficiency> (дата обращения 03.03.2021).

20 Федоренко В.Ф., Мишуров Н.П., Трубицын Н.В., Таркинский В.Е.

Применение инерциальной навигации для определения буксования сельскохозяйственных тракторов // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28. – Вып. 1. – С. 8–23.

21 Таркинский В.Е. Исследование методов получения и цифровой обработки сигнала датчика поворота колеса сельскохозяйственного трактора // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ им. В.П. Горячкина». – 2018. – № 5 (87). – С. 11–20.

22 Проведение исследований и разработка нового метода определения оптимального режима работы дизельных двигателей в реальном режиме времени: отчет о НИР / ФГБНУ «РОСИНФОРМАГРОТЕХ»; рук. Таркинский В.Е.; исполн. Иванов А.Б., [и др.]. – М., 2020. – 93 с.

23 Саяпин, В.И. Удельные параметры гусеничных тракторов // Труды ЧИМЭСХ. Челябинск, 1950. – Вып.4. – С. 33–59.

24 Local regression [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Local_regression (дата обращения: 20.04.2021).

25 Smoothing by Local Regression: Principles and Methods W. S. Cleveland и С. L. Loader (1996) [Электронный ресурс]. URL: <http://cm.bell-labs.com/cm/ms/departments/sia/doc/> (дата обращения: 23.04.2021).

26 Cleveland W.S., Devlin S.J. Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting // Journal of the American Statistical Association. – 1988. – Vol. 83, pp. 596–610.

27 Smoothing: Local Regression Techniques [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/45130357_Smoothing_Local_Regression_Techniques (дата обращения: 11.04.2021).

28 Bowman A. W., Azzalini, A. Applied smoothing techniques for data analysis. UK, Oxford: Oxford University Press, 1997. – 204 с.

29 Tractors Standard Codes [Электронный ресурс]. URL: <https://www.oecd.org/agriculture/tractors/codes/> (дата обращения: 20.05.2021).

30 Nebraska Tractor Test Laboratory. Test Reports [Электронный ресурс]. URL: <https://tractortestlab.unl.edu/test-page-nttl/> (дата обращения: 20.05.2021).

31 Таркинский В.Е., Трубицын Н.В., Воронин Е.С. Программное обеспечение измерительных информационных систем для испытаний сельскохозяйственной техники // Техника и оборудование для села. – 2019. – № 9. – С. 12–15.

32 Федоренко В.Ф., Таркинский В.Е. Цифровые беспроводные технологии для оценки показателей сельскохозяйственной техники // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2020. – № 1. – С.10–15.