

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Российский научно-исследовательский институт информации и технико-
экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению
агропромышленного комплекса» Министерства сельского хозяйства
Российской Федерации – Новокубанский филиал (КубНИИТиМ)

На правах рукописи

Иванов Артем Борисович



**РАЗРАБОТКА ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
академик РАН,
доктор технических наук,
профессор
Федоренко Вячеслав Филиппович

Новокубанск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	14
1.1 Энергонасыщенность современных сельскохозяйственных тракторов.....	14
1.2 Тягово-сцепные качества сельскохозяйственных тракторов	17
1.3 Повышение топливно-энергетической эффективности МТА за счет выбора оптимального режима работы	23
1.4 Анализ существующих методов и технических средств для определения энергетических параметров работы МТА.....	36
1.5 Выводы по главе.....	58
1.6 Цели и задачи исследования	60
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ	61
2.1 Обоснование и математическое моделирование метода инструментального контроля степени использования мощности двигателя	61
2.2 Обоснование и математическое моделирование метода инструментального контроля скорости движения и буксования колес трактора.....	69
2.3 Обоснование и математическое моделирование метода расчета оптимального соотношения скоростного режима работы двигателя и ступени трансмиссии	84
2.4 Обоснование и математическое моделирование метода расчета балластировки трактора	87
2.5 Выводы по главе.....	94
ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	96
3.1 Программа и методика экспериментальных исследований метода инструментального контроля степени использования мощности двигателя	96

3.1.1 Разработка устройства определения давления наддува во впускной магистрали двигателя	97
3.1.2 Разработка устройства для измерения тягового сопротивления сельскохозяйственного орудия.....	99
3.1.3 Измерительно-регистрирующая аппаратура и программное обеспечение	100
3.2 Программа и методика экспериментальных исследований метода инструментального контроля скорости движения и буксования колес трактора.....	104
3.2.1 Разработка устройства для определения буксования.....	105
3.2.2 Измерительно-регистрирующая аппаратура и программное обеспечение	107
3.3 Выводы по главе.....	108
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	109
4.1 Результаты экспериментальных исследований зависимости давления наддува во впускной магистрали двигателя от нагрузки на трактор во время выполнения технологической операции.....	109
4.2 Сравнительная оценка результатов определения энергетических показателей работы МТА по разработанному и стандартному методам.....	112
4.3 Применение метода определения загрузки двигателя по давлению наддува для выбора оптимального режима работы МТА.....	118
4.4 Результаты экспериментальных исследований разработанного метода инструментального контроля скорости движения и буксования колес трактора.....	121
4.5 Выводы по главе.....	126
ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	128

5.1	Разработка телеметрической системы повышения энергоэффективности МТА	128
5.1.1	Концепция телеметрической системы повышения энергоэффективности МТА	128
5.1.2	Структурная схема телеметрической системы повышения энергоэффективности МТА	131
5.1.3	Разработка экспериментального образца телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора»	134
5.1.4	Экспериментальная проверка телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора»	140
5.2	Рекомендации по применению разработанных методов и телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора»	148
5.2.1	Рекомендации по применению методов инструментального контроля степени использования мощности двигателя, скорости движения и буксования колес трактора	148
5.2.2	Рекомендации по применению телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора»	149
5.3	Оценка экономической эффективности результатов применения телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора» при выполнении сельскохозяйственных операций	152
5.3.1	Определение затрат на изготовление телеметрической системы	153
5.3.2	Технико-экономический анализ	156
5.4	Выводы по главе	160
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	161
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	164
	ПРИЛОЖЕНИЯ	184
	Приложение А	185
	Приложение Б	186

Приложение В.....	187
Приложение Г	188

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Технический уровень и энергетические возможности современных тракторов, позволяют обеспечить их агрегатирование с широким спектром сельскохозяйственных орудий различного назначения и различных производителей, а также 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.

Ключевым недостатком двигателей внутреннего сгорания является невозможность обеспечения равной энергоэффективности во всем диапазоне нагрузок и частоты вращения коленчатого вала, тем не менее, всережимность регулирования рабочего процесса двигателя, при правильном выборе скоростного режима, позволяет существенно повысить топливную эффективность при работе с нагрузками, отличными от номинальных. А в комбинации с правильным выбором передаточного отношения трансмиссии, позволяет обеспечить неизменную производительность МТА при существенном повышении топливной экономичности.

Кроме того, 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 её структуры, повышению подверженности ветровой эрозии, ухудшению влаго- и воздухопроницаемости и, в конечном счете, к снижению плодородия. Не менее часто трактор эксплуатируется с превышением достаточного для реализации необходимого

тягового усилия весом. Буксование движителей трактора в данном случае мало, однако увеличиваются потери мощности на перекачивание 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.

Для возможности выбора, наиболее соответствующего текущим условиям, режима работы сельскохозяйственного агрегата необходимо, в первую очередь, в реальном времени, иметь информацию о нагрузочном и скоростном режиме работы двигателя, степени и потенциале использования его мощности, и буксовании движителей трактора, что без эффективных методов и средств эксплуатационного контроля не представляется возможным. Однако, не меньшее значение имеет качество принимаемых оператором решений по изменению режима работы машинно-тракторного агрегата (выбор ступени трансмиссии, настройки частоты вращения коленчатого вала двигателя, установка давления в шинах, навешивание на трактор требуемого количества балластных грузов).

Способствовать решению этой задачи может измерительно-информационная система, позволяющая, на основе инструментального контроля текущих параметров МТА, информировать оператора о возможности и способах достижения их оптимальных значений.

Степень разработанности темы исследования. Научные основы исследований сельскохозяйственных машин и машинных агрегатов сформированы на базе работ В.П. Горячкина, И.И. Артоболевского, В.Н. Болтинского, П.М. Василенко, В.И. Черноиванова М.Н. Летошнев, Б.С. Свирщевского. Проблема анализа технического уровня машинно-тракторных агрегатов, разработка показателей эффективности и путей их достижения для разрабатываемой и эксплуатируемой техники постоянно находится в разработках ведущих научных учреждений страны, таких как ВИМ, ВНИИПТИМЭСХ, ВНИИТиН, ГОСНИТИ, КубГАУ, ДонГАУ, КалмГУ, ЧГАУ и др. Значительный

вклад в решение проблемы внесли исследования Л.П. Кормановского, Я.П. Лобачевского В.М. Кряжкова, И.П. Ксеновича, А.Ю. Измайлова, Г.Е. Листопада, Ю.Ф. Лачуги, В.В. Кузнецова, Н.М. Морозова, В.Ф. Федоренко, Э.И. Липковича, Л.Е. Агеева, С.А. Иофинова, В.Б. Рыкова, А.Г. Левшина, В.А. Эвиева, В.А. Русанова, В.В. Кацыгина Д.А. Чудакова и др. ученых.

Общий анализ литературных источников показал, что с решением задачи наилучшей топливной экономичности во всем диапазоне нагрузочных режимов, наиболее успешно справляются тракторы с автоматической бесступенчатой трансмиссией, однако, в силу многих причин, они составляют меньшинство парка тракторов, находящихся в эксплуатации. При работе трактора со ступенчатой коробкой передач и низкой степенью автоматизации, также существует возможность, с помощью манипуляций частотой вращения коленчатого вала двигателя и ступеней трансмиссии, подобрать наиболее экономичный режим работы в сложившихся условиях. Проблема обеспечения оптимальных тягово-сцепных свойств, актуальна для всех тракторов, выполняющих широкий спектр сельскохозяйственных работ, не зависимо от типа трансмиссии.

Выбор наиболее энергоэффективного режима работы МТА является довольно сложной задачей, на качество решения которой влияет способность объективно и точно определить текущие параметры работы агрегата, адекватно оценить потенциальные возможности повышения экономичности выполняемой операции и предпринять необходимые управляющие воздействия.

Цель исследования. Разработка телеметрической системы, в режиме онлайн обеспечивающей оператора информацией, способствующей повышению энергоэффективности машинно-тракторных агрегатов.

Для решения поставленной цели определены **задачи исследования:**

1. Исследовать и обосновать инструменты контроля и оптимизации использования мощности двигателя трактора при выполнении сельскохозяйственных работ в производственных условиях.

2. Теоретически исследовать и обосновать метод и средства контроля скорости движения и буксования движителей трактора при выполнении сельскохозяйственных работ.

3. Экспериментально исследовать и обосновать параметры системы повышения энергоэффективности машинно-тракторных агрегатов.

4. Разработать, изготовить и испытать экспериментальный образец телеметрической системы.

5. Провести технико-экономическую оценку применения телеметрической системы повышения энергоэффективности машинно-тракторных агрегатов в производственных условиях.

Объект исследования – эксплуатационные режимы и параметры машинно-тракторного агрегата, энергосредством которого является колесный трактор со ступенчатой трансмиссией.

Предмет исследования – эффективность применения средств инструментального контроля параметров работы машинно-тракторного агрегата при выполнении сельскохозяйственных операций.

Научная новизна работы представлена:

– расчетно-теоретическим и экспериментальным обоснованием нового метода определения энергетических параметров работы машинно-тракторного агрегата на основе текущей информации о давлении газотурбинного наддува двигателя трактора;

– расчетно-теоретическим и экспериментальным обоснованием нового метода определения буксования движителей трактора с использованием глобальных навигационных спутниковых систем;

– расчетно-теоретическим и экспериментальным обоснованием экономической целесообразности применения телеметрической системы для повышения топливной экономичности и производительности выполнения сельскохозяйственных операций машинно-тракторными агрегатами.

Научная новизна подтверждена положительными решениями на государственную регистрацию программы для ЭВМ и встроенной программы

блока-трансммиттера телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора»: «Умный помощник тракториста» и «ПАМ-трансммиттер».

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработан метод определения энергетических параметров работы машинно-тракторного агрегата на основе измерения давления газотурбинного наддува двигателя трактора;
- разработан метод определения скорости движения и буксования ведущих колёс трактора на основе глобальных навигационных спутниковых систем;
- предложено применение метода непараметрической регрессии LOESS (locally estimated scatterplot smoothing – метод локальных полиномиальных регрессий) для аналитического представления эмпирических взаимосвязей параметров, определяющих регуляторные (скоростные) характеристики двигателей и тяговые характеристики тракторов;
- разработана концепция и структурная схема телеметрической системы, позволяющей, на основании мониторинга текущих параметров работы машинно-тракторного агрегата информировать оператора о возможности повышения производительности и (или) топливной экономичности выполняемой операции и о способах достижения этих возможностей;
- разработан и апробирован экспериментальный образец телеметрической системы повышения энергоэффективности эксплуатации машинно-тракторных агрегатов «Персональный ассистент механизатора»

Внедрение результатов исследования. Результаты исследований внедрены и используются по назначению в ООО «НТЦ Электропривода «Вектор» и в ФГБУ «Северокавказская МИС»

Методология и методы исследования. При выполнении работы использовались общепринятые принципы и теории, применяемые при решении научно-исследовательских и производственных задач. При сборе информации и обработке полученных результатов использовались классические методы статистики. Измерения выполнялись с применением современных методов и

аттестованных средств контроля. Расчеты и обработка результатов экспериментальных исследований выполнялись с использованием ПЭВМ и пакета прикладных программ.

Экспериментальные исследования проведены в реальных условиях эксплуатации в соответствии с государственными стандартами на методы испытаний сельскохозяйственной техники.

Положения, выносимые на защиту:

- обоснование эффективности применения методов и средств инструментального контроля для выбора наиболее энергоэффективных режимов работы и конфигураций машинно-тракторных агрегатов в изменяющихся условиях эксплуатации;
- метод определения энергетических параметров работы машинно-тракторных агрегатов путем измерения давления газотурбинного наддува двигателя;
- метод определения фактической скорости движения и буксования колес трактора с помощью одночастотного приемника ГНСС;
- методика проведения полевых исследований методов определения энергетических параметров работы машинно-тракторных агрегатов, скорости движения и буксования колес трактора;
- концепция и структурная схема телеметрического устройства повышения энергоэффективности эксплуатации машинно-тракторных агрегатов;
- результаты апробации, внедрения и технико-экономическая эффективность экспериментального образца телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора» при выполнении сельскохозяйственных операций в производственных условиях.

Степень достоверности и апробации результатов. Тематика исследований по указанной проблеме включалась в планы научно-исследовательской работы ФГБНУ «Росинформагротех» «Проведение исследований и разработка нового метода определения оптимального режима

работы дизельных двигателей в реальном режиме времени», «Исследование и разработка нового метода оптимизации балластировки трактора путем определения буксования колес с помощью элементов спутниковой навигации» и «Проведение исследований и разработка устройства для повышения эффективности эксплуатации машинно-тракторных агрегатов», выполненных в 2020, 2021 и 2022 г.г. соответственно.

Основные научные положения, выводы и практические рекомендации исследований доложены и одобрены на XII, XIII, XIV международных научно-практических конференциях «Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК» (ФГБНУ «Росинформагротех», Москва, 2020-2022 гг.), I, II международных научно-практических конференциях «Обеспечение устойчивого развития в контексте сельского хозяйства, зеленой энергетики, экологии и науки о земле» (г. Смоленск, 2021, 2022 гг.), III Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетического комплекса: добыча, производство, передача, переработка и защита окружающей среды» (г. Москва, 2021 г.), Международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие в сельском хозяйстве, экологическая безопасность и энергетическая эффективность» (г. Саратов, 2021 г.), Международной научно-практической конференции «Обеспечение устойчивого развития: сельское хозяйство, экология и науки о земле (AEES 2021)» (г. Душанбе, 2021 г.), Международной научно-практической конференции «Вопросы сельского хозяйства, экологии, картографии и геоинформатики в контексте техники и информатики» (г. Душанбе, 2022 г.).

Публикация материалов исследования. По материалам диссертационной работы опубликовано 21 печатная работа, в том числе 8 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 публикаций в изданиях, рецензируемых Scopus, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 3 зарегистрированных отчёта по научно-исследовательской работе, 9 публикаций

по результатам работы научно-практических конференций, 3 публикации в рецензируемых научных изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает в себя следующие разделы: введение, 5 глав, заключение, список литературы из 172 наименований, в том числе 50 на иностранных языках, 4 приложения, 21 таблицу, 80 рисунков, изложена на 188 страницах.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Энергонасыщенность современных сельскохозяйственных тракторов

Сельскохозяйственные тракторы – сложные мобильные энергетические и транспортные средства, используемые для комплексной механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства, а также для перевозки сельскохозяйственных грузов и пассажиров.

Сельскохозяйственные тракторы должны соответствовать ряду требований, которые базируются на научно обоснованных эксплуатационных показателях и свойствах. К числу этих требований относятся прежде всего обеспечение высокой производительности и экономичности, выполнение всего комплекса сельскохозяйственных работ качественно, в наилучшие агротехнические сроки [1, 5, 10, 11, 12, 14, 16, 19, 21, 22, 32, 34, 42, 43, 49, 56, 59, 60, 61, 65, 88, 83, 97, 99, 107, 111, 113, 115, 117, 119].

Существует множество факторов, влияющих на эффективность сельскохозяйственных машин, в том числе рельеф, тип и состояние почвы, степень засоренности камнями, высота над уровнем моря и размеры поля. [73, 107]. Полевые условия могут включать размеры участка, длину колеи, рельеф, засоренность камнями, изрезанность препятствий, сложность конфигурации, плотность земли, механический состав, плотность и влажность почвы [48, 71]. Все эти факторы оказывают существенное влияние на выходные показатели машинно-тракторного агрегата. Производители постоянно совершенствуют конструкцию и энергонасыщенность сельскохозяйственных тракторов, чтобы обеспечить максимальную эффективность при выполнении всего комплекса сельскохозяйственных работ.

Удельная энергонасыщенность трактора $\mathcal{E}_{\text{тр}}$, кВт/кН, определяется по формуле

$$\varepsilon_{\text{тр}} = \frac{N_{\text{эксп}}}{P_{\text{тр}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{эксп}}$ – эксплуатационная мощность двигателя, кВт;

$P_{\text{тр}}$ – эксплуатационный вес трактора без балласта, кН.

Анализ протоколов испытаний 124-х моделей сельскохозяйственных тракторов тягового класса от 1,4 до 8 по ГОСТ 27021-86 [24] и мощностью двигателя от 60 до 460 кВт (рисунок 1), опубликованных Nebraska Tractor Test Laboratory [137], показывает, что удельная энергонасыщенность рассмотренных моделей тракторов варьируется в довольно широком диапазоне (от 1,45 кВт/кН у трактора Challenger MT945 до 2,35 кВт/кН у трактора John Deere 9530), у большинства же моделей составляет 1,8-2,1 кВт/кН (рисунки 2, 3) [40, 76]. Также на рисунке 2 видно, что довольно широко удельная энергонасыщенность варьируется в пределах модельных рядов тракторов одного производителя в рамках одного тягового класса, что объясняется тем, что в пределах одной серии, производитель выпускает модели в нескольких вариантах мощности двигателя.

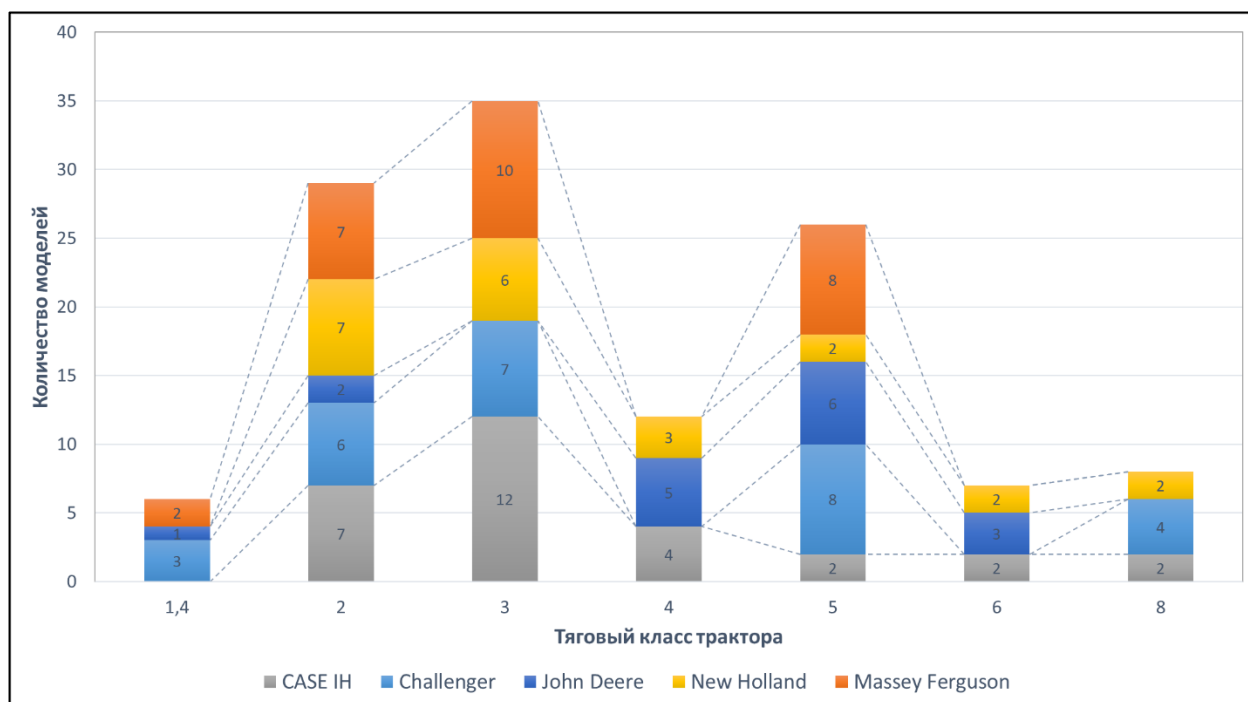


Рисунок 1 – Распределение количества моделей по тяговым классам

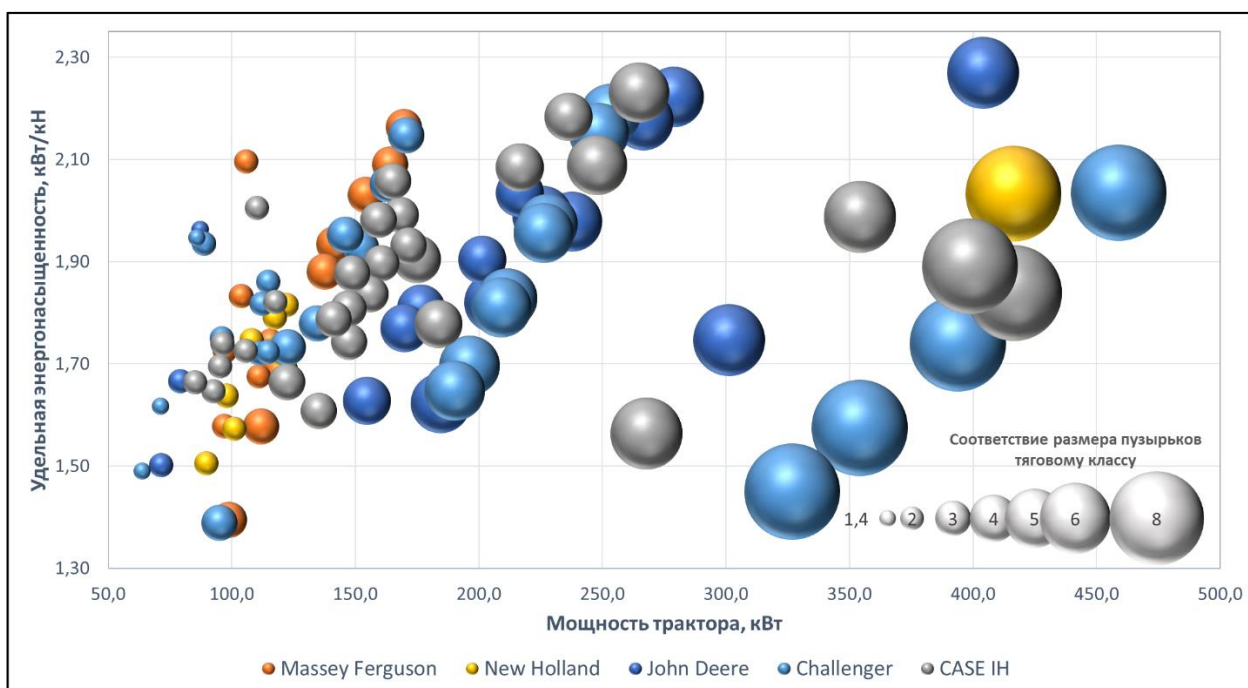


Рисунок 2 – Удельная энергонасыщенность тракторов

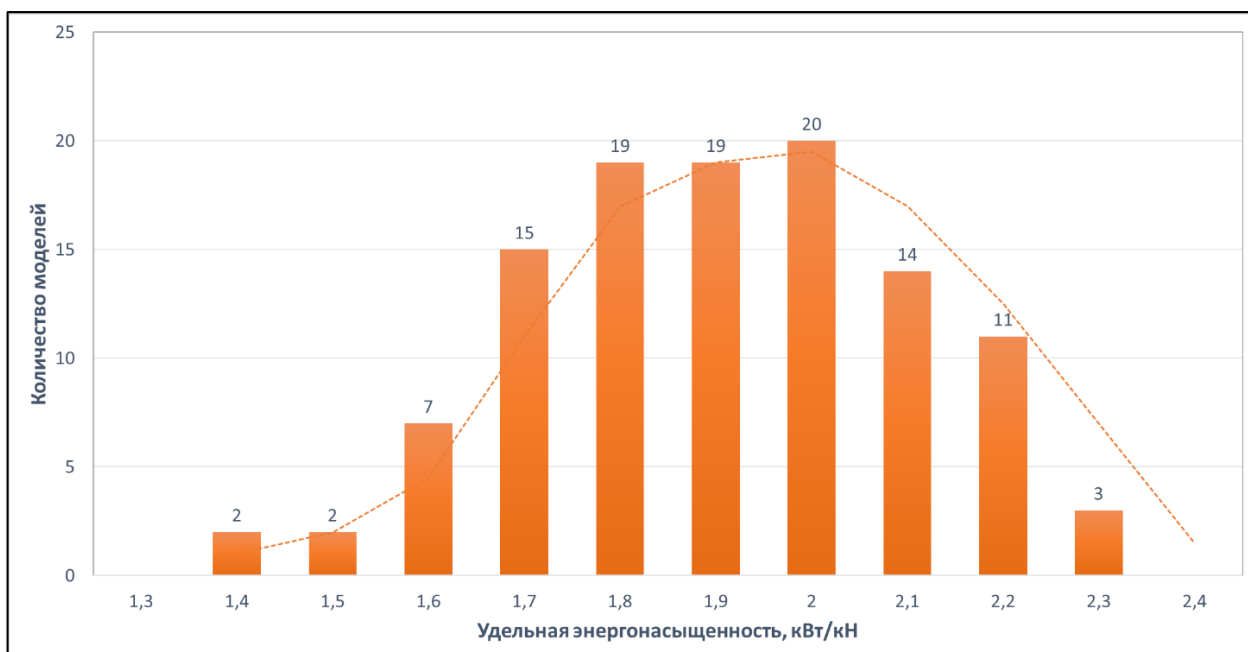


Рисунок 3 – Гистограмма распределения количества моделей тракторов по параметру значений удельной энергонасыщенности

Стремясь обеспечить максимальную производительность и универсальность при выполнении полного комплекса сельскохозяйственных работ с соответствующим качеством и с соблюдением установленных агротехнических

сроков в условиях, характеризующихся изменяющимися природно-климатическими и производственными факторами, производители повышают удельную энергонасыщенность сельскохозяйственных тракторов. В то же время, как показывают результаты исследований различных ученых, высокая энергонасыщенность, превышающая 1,5 кВт/кН, приводит к снижению экономической эффективности сельскохозяйственных работ по причине недозагрузки двигателя трактора [1, 2, 9, 31, 32, 40, 45, 60, 62, 76, 116, 141, 146].

1.2 Тягово-сцепные качества сельскохозяйственных тракторов

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 [4, 7, 8, 33, 44, 46, 53, 58, 83, 106, 110, 161]

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 вибронагруженности 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 перетирание ее структурных составляющих в результате буксования,

отрицательно сказывается на плодородии, сопутствует развитию эрозии, ведет к деградации почв [82].

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 [84, 124, 162]. В колее тракторов резко возрастает плотность и твердость почвы [52, 75, 78, 85, 132]. 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 [82].

Образующаяся колея 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 [86].

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.

Деградацию структуры почвы можно рассматривать с точки зрения морфологии почвы (описание профиля) и с точки зрения характеристик измерения (таких как плотность и агрегаты). Первым признаком деградации структуры почвы является образование крупных и плотных блоков, объем которых равен объему вытесняемого воздуха. Вторым признаком – «расслоение» структуры почвы – такая структура является серьезным препятствием для проникновения корней и влаги в нижние слои. На рисунке 4 показаны разрезы

грунта глубину 0-24 см в зоне движения техники (а) и в зоне, свободной от уплотнения (б). На (а) отчетливо видна деградация структуры почвы в виде пластинчатой структуры, тогда как на (б) почва имеет рыхлую структуру, богатую порами (черный цвет), особенно в верхнем слое [82].

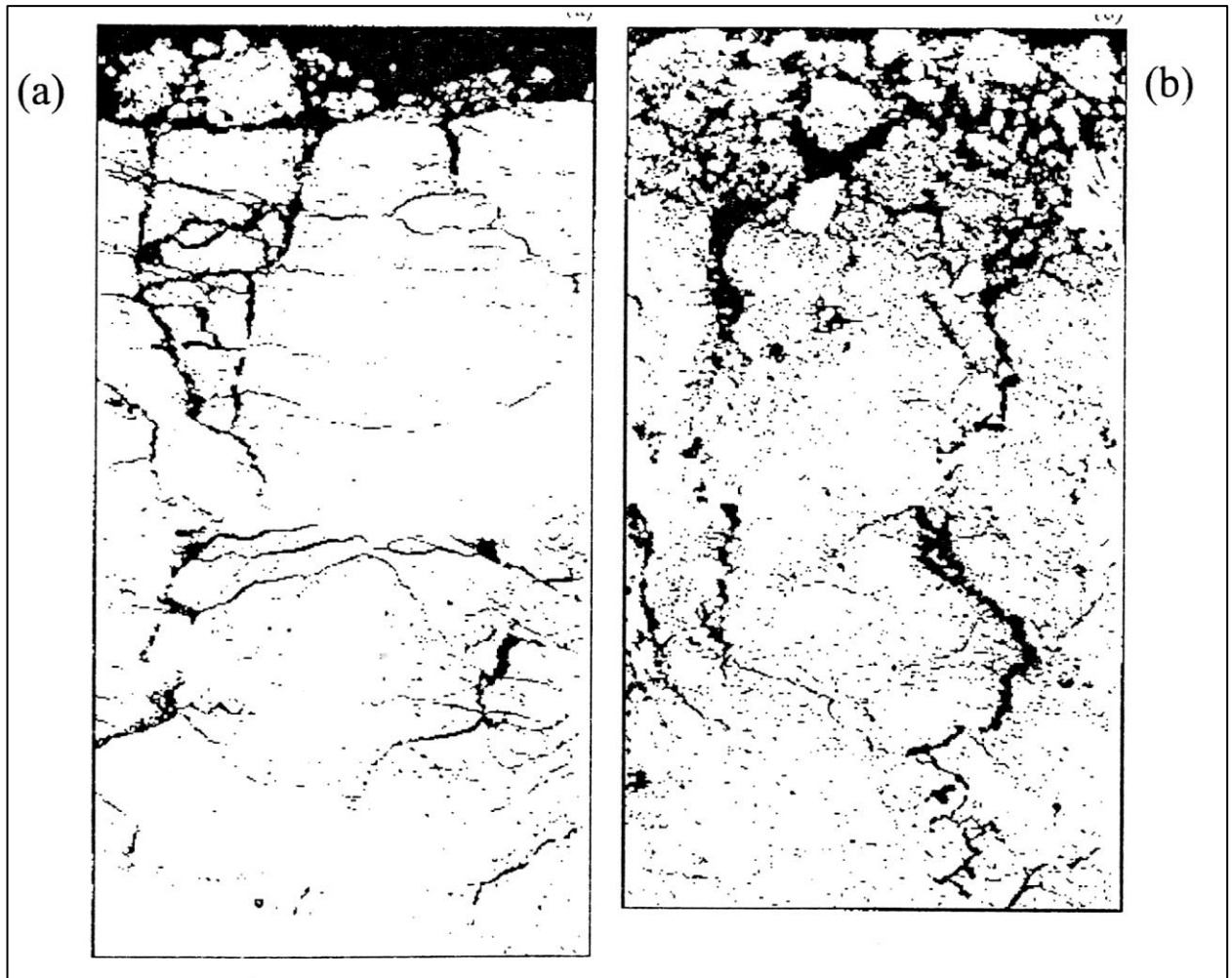


Рисунок 4 – Изображение структуры почвы в зоне движения техники (а) и на участке, свободном от воздействия движителей (б) [82]

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 [84, 86], 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 машинотракторных агрегатов применяются технологические, агрономические и конструкторские мероприятия [47, 53, 106].

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 [36, 82].

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) [75, 148].

Конструкторские – совершенствование тракторов и сельхозмашин, их движителей, снижение их материалоемкости, применение движителей с увеличенной опорной поверхностью, повышение их тягово-сцепных свойств [18, 33, 72, 74]. 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 [47].

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.) [82].

Сельскохозяйственные тракторы эксплуатируются в условиях, существенно варьирующихся в зависимости от природно-климатических и естественно-производственных зон. Потому 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

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

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, 54, 144, 171].

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 [57, 93, 94, 95, 121]. 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 [167]. 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 [141, 142].

1.3 Повышение топливно-энергетической эффективности МТА за счет выбора оптимального режима работы

Сельскохозяйственные тракторы работают в агрегате с орудиями в основном как тягачи и источники энергии посредством вала отбора мощности, таким образом формируя мобильное энергетическое средство, которое должно обеспечивать высокую производительность и экономичность при выполнении всего комплекса сельскохозяйственных работ, с соответствующим качеством и в установленные агротехнические сроки. При этом, на выходные показатели работы машинно-тракторного агрегата, значительное влияние оказывают такие характеристики как: размер и сложность конфигурации участка, длина гона, макро- и микрорельеф, засоренность камнями, плотность и влажность почвы и т.д. [31, 48, 56, 149].

Тракторы, находящиеся в эксплуатации, часто имеют не идеальную конфигурацию, а вспомогательные и автоматические функции для комплексной оптимизации тягового режима не всегда доступны. Из-за постоянно растущей мощности двигателя, с одной стороны, и законодательных или почвенно-физических ограничений по размеру или весу, с другой стороны, все чаще достигаются пределы эффективной тяги. Около 40 % потерь, происходящих между коленчатым валом и рабочим орудием, обусловлены сопротивлением качению и буксованием при типичной тяговой работе в поле. Современные трансмиссии находятся на высоком техническом уровне и вносят лишь около четверти от общих потерь. Вспомогательные и обслуживающие агрегаты, в

зависимости от своего назначения, имеют сходный порядок величины. Распределение потерь мощности энергонасыщенного трактора при работе с тяжелым культиватором на обработке стерни, наглядно показывает диаграмма Санки, представленная на рисунке 5 [77].

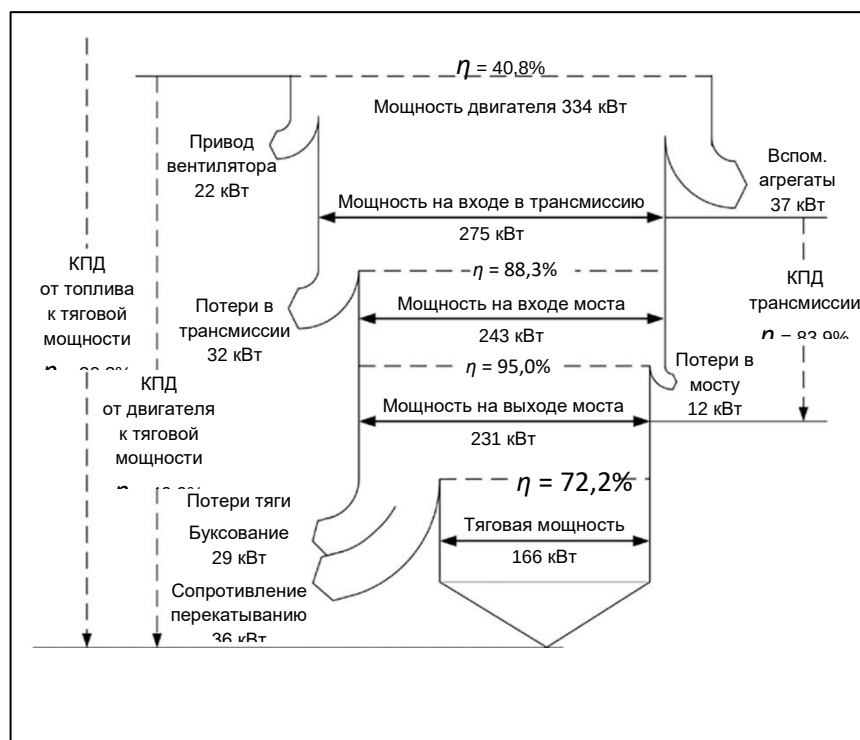


Рисунок 5 – Баланс потерь мощности энергонасыщенного трактора

Таким образом, лишь 20 % энергии, запасенной в дизельном топливе, остается в качестве тягового усилия для орудий. Повышение средней тяговой эффективности на пять процентных пунктов (например, с 70 % до 75 %) при типичных для трактора мощностью 400 кВт параметрах (1200 рабочих часов в год, из них 60 % тяговой работы при 80 % загрузки двигателя, цена дизельного топлива 52 руб./л, удельный расход 194 г/кВт·ч без вспомогательного оборудования, потребная мощность вспомогательного оборудования 60 кВт, КПД трансмиссии 85 %) означает снижение годовых затрат на топливо примерно на 173000 руб. Экономия топлива также приводит к значительному сокращению выбросов CO₂ – примерно на 8,7 т в год. Эти улучшения также представляются вполне достижимыми [12, 13, 63, 64, 131, 135, 147, 152, 159]. Однако в настоящее время пользователю все еще не хватает полноты данных о нагрузке на колеса и

тяговом усилии, а также точных значений буксования, без которых невозможно определить оптимальный балласт и правильное давление в шинах. Глубина обработки также играет важную роль в потребляемой мощности. Однако, этот параметр рабочего процесса имеет особое значение для качества выполнения работы и поэтому пока не должен находиться в распоряжении оператора. Стратегическая ответственность за выполнение рабочего задания остается за механизатором. Таким образом, определение цели для повышения эффективности эксплуатации МТА может быть сформулировано следующим образом [53, 65, 87]: конфигурация трактора и режима работы МТА обеспечивает оптимизацию для минимального расхода топлива или максимальной производительности, при заданных агротехнических требованиях к выполняемой операции.

Для машинно-тракторного агрегата фиксированной конфигурации, производительность прямо зависит от скорости движения, задаваемой оператором. Основными ограничениями для повышения скорости выступают:

- ограничения, накладываемые способностью орудия обеспечивать качество выполнения технологической операции;
- ограничения, накладываемые доступной мощностью двигателя трактора;
- ограничения, накладываемые конструкцией шасси и трансмиссии трактора;
- ограничения, накладываемые управляемостью трактора;
- ограничения, накладываемые необходимостью обеспечения требований безопасности и условий работы оператора.

Для регулирования скорости движения, механизатору предоставляется возможность изменения передаточного отношения трансмиссии и изменение скорости вращения приводного вала трансмиссии (коленчатого вала двигателя).

Обеспечение минимального расхода топлива при выполнении сельскохозяйственной операции на заданном режиме, для оператора сопряжено с необходимостью обеспечения максимального тягового КПД и обеспечения наиболее экономичного режима работы двигателя.

Особенностью дизельных двигателей является неоднородность топливной эффективности на различных нагрузочных и скоростных режимах (рисунок 6).

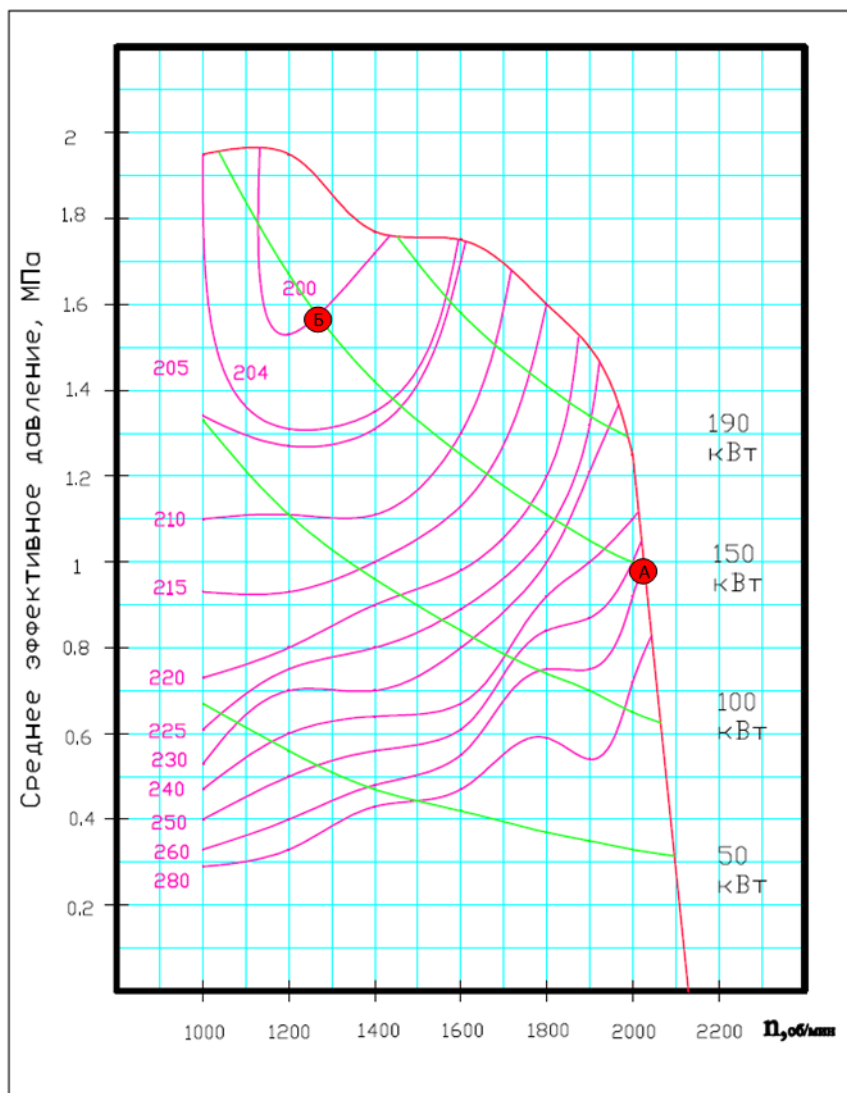


Рисунок 6 – Комбинированная характеристика дизельного двигателя

На рисунке видно, что максимальная топливная эффективность обеспечивается при работе двигателя на внешней характеристике, т.е. при полной нагрузке. При уровне загрузки двигателя, отличном от номинальной, топливная экономичность значительно ухудшается. Тем не менее, изменяя скорость вращения коленчатого вала двигателя, возможно получить одинаковую выходную мощность при меньших значениях удельного расхода топлива (точки А и Б на рисунке 6), но, в этом случае, для обеспечения необходимой скорости движения трактора (и производительности работы машинно-тракторного агрегата),

механизатор должен соответственным образом изменить передаточное отношение трансмиссии.

Наилучшим путем решения проблемы рационального использования мощности трактора, является внедрение надежных и эффективных бесступенчатых трансмиссий, которые позволяют автоматически, без участия оператора, на всех видах работ поддерживать наиболее экономичный режим работы двигателя [13, 50, 51, 114]. Для тракторов со ступенчатыми трансмиссиями, рекомендуется применять технологию SUTB (shifted-up and throttled-back), которая позволяет поддерживать одинаковую скорость движения на различных передачах и подразумевает снижение частоты вращения коленчатого вала при переходе на более высокую ступень трансмиссии и наоборот [145, 146, 149]. Одни из самых ранних результатов исследований, показывающих эффективность применения данной технологии управления МТА, опубликованы в 1919 году, американским инженером Эдвардом Р. Хьюитом [136]. Тогда же, Хьюит обозначил и ряд проблем, вызывающих сложности для применения технологии SUTB.

Для эффективного использования технологии SUTB, оператор должен самостоятельно оценить необходимую для выполнения технологической операции энергетическую потребность и сопоставить ее с мощностной, топливно-экономическими характеристиками двигателя и возможным рядом передаточных отношений трансмиссии. Затем, с учетом ограничений, накладываемых требованиями к качеству выполнения сельскохозяйственной операции, принять решение о возможности повышения скорости движения агрегата, либо о возможности снижения частоты вращения коленчатого вала и переходе на повышенную ступень трансмиссии для поддержания прежней скорости. В качестве входных данных для такого анализа, оператор может использовать информацию, полученную с панели приборов трактора (частота вращения коленчатого вала двигателя, установочная скорость движения трактора), а также информацию, полученную органолептическим методом (тональность и характер звука двигателя, цвет и дымность отработавших газов, равномерность движения,

изменение вибраций и т.п.), при этом эффективность анализа и последующего принятия решений носит субъективный характер и в большей степени зависит от квалификации и опыта оператора.

Для понимания проблемы обеспечения максимально-возможного в сложившихся условиях тягового КПД, на рисунке 7 представлены основные силы, действующие на отдельное колесо: M_{Nabe} – крутящий момент, приложенный к колесу, F_g – сила, с которой колесо прижимается к опорному основанию и F_t – развиваемая сила тяги.

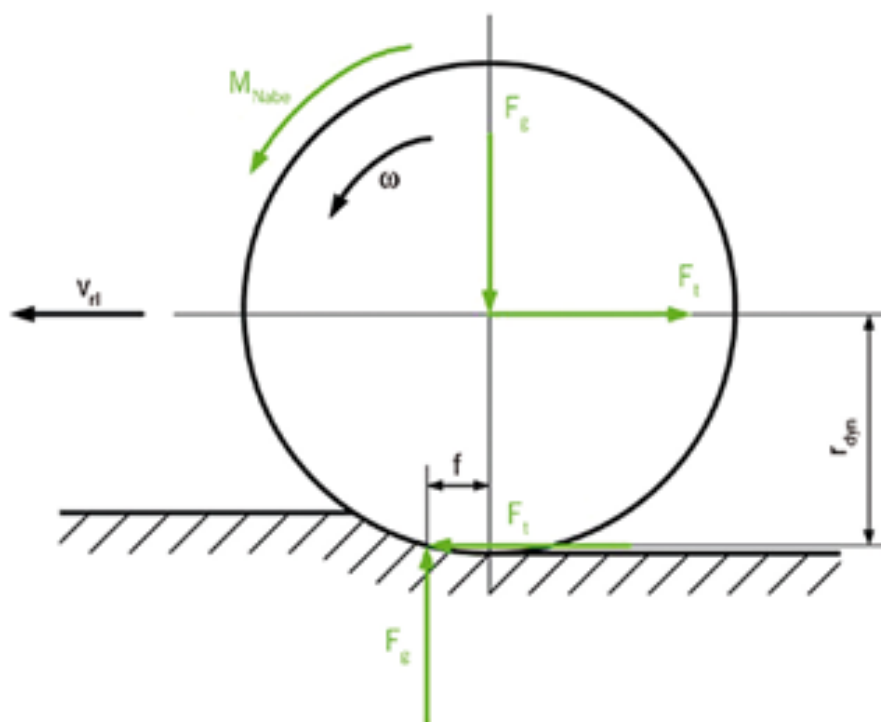


Рисунок 7 – Силы, действующие на ведущее колесо на деформируемом грунте

Исходя из равновесия моментов согласно уравнению (3), используем описание с помощью безразмерных коэффициентов, чтобы сделать различные сценарии и машины сравнимыми

$$M_{Nabe} = F_g \cdot f + F_t \cdot r_{dyn}. \quad (3)$$

Коэффициент движущей силы k определяется в соответствии с уравнением

$$k = \frac{F_t}{F_g}, \quad (4)$$

а коэффициент сопротивления качению ρ – в соответствии с уравнением

$$\rho = \frac{f}{r_{dyn}}. \quad (5)$$

Теоретическая скорость ступицы колеса относительно земли рассчитывается на основе динамического радиуса качения r_{dyn} и угловой скорости ω колеса. Фактическая, реальная скорость относительно земли – v_{rl} . Тогда коэффициент буксования δ определяется как

$$\delta = \frac{v_{rl}}{\omega \cdot r_{dyn}}. \quad (6)$$

Тяговый КПД η суммирует эти величины

$$\eta = \frac{k}{k + \rho} \cdot (1 - \delta). \quad (7)$$

Здесь следует отметить, что коэффициент тяги k – это не физическая константа сочетания грунт-шина, а ключевой показатель, который определяется в зависимости от мгновенных условий работы. Типичные значения коэффициента тяги для трактора в обычных полевых условиях составляют приблизительно 0,35–0,45 при буксовании от 8 % до 15 % и коэффициенте сопротивления качению 0,08–0,11. На рисунке 8 представлены два способа отображения тяговых характеристик колеса: слева в зависимости от фактического буксования (наиболее распространенное, но не всегда точное при небольших значениях буксования),

справа в зависимости от коэффициента тяги (хорошо виден широкий и стабильный максимум эффективности тяги)

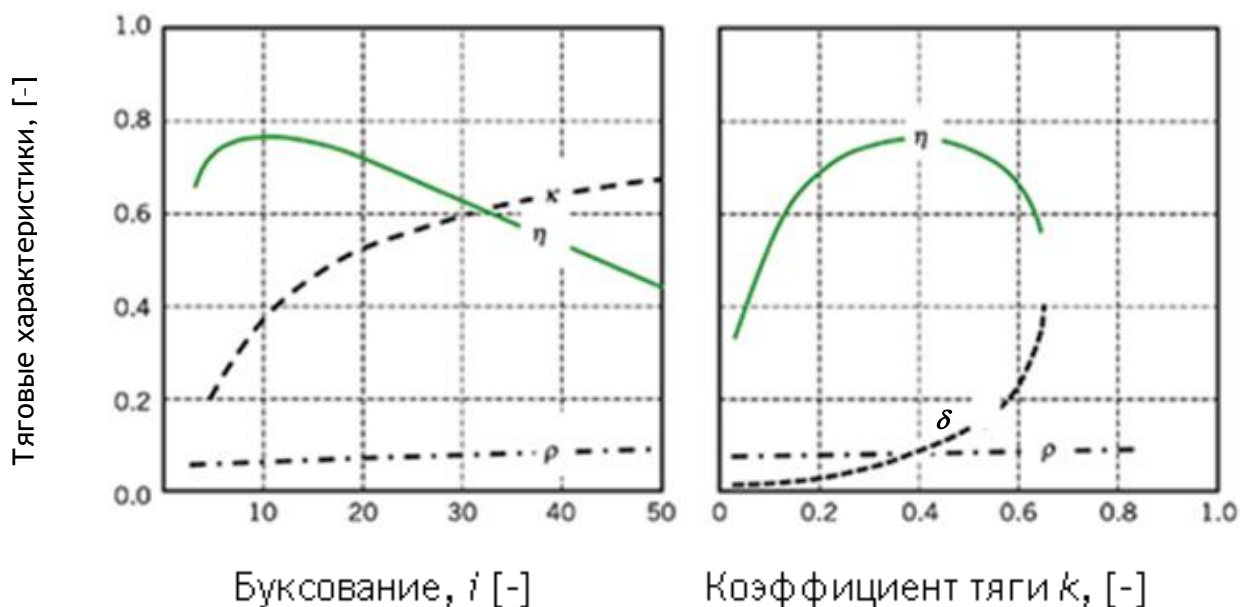


Рисунок 8 – Тяговые характеристики в двух способах отображения: слева в зависимости от коэффициента буксования, справа – от коэффициента тяги

При значении коэффициента тяги около 0,4 оптимум может быть достигнут почти на всех пахотных почвах с хорошей проходимостью [123, 158, 172]. Таким образом, идеальная сумма сил в контакте колес (эксплуатационный вес, кН) соответствует примерно 2,5-кратному тяговому усилию. Это эмпирическое правило также подходит для дополнительных практических требований, таких как трогание под нагрузкой, поскольку достаточный запас тягового усилия (с увеличением буксования) доступен до тех пор, пока машина не заглохнет. Если эксплуатационный вес завышен, то сопротивление качению слишком велико в сравнении с тягой; если вес слишком мал, то слишком велико буксование. Для различных почв, взаимосвязь между коэффициентом тяги и тяговым КПД может быть хорошо проиллюстрирована диаграммой Бриксиуса [126], представленной на рисунке 9. Индекс проходимости B_N характеризует контакт шины с почвой. Малые значения означают мягкую почву и (или) высокую нагрузку на колеса, большие – наоборот. Типичные для возделывания почвы имеют значения индекса проходимости в диапазоне от 20 до 80.

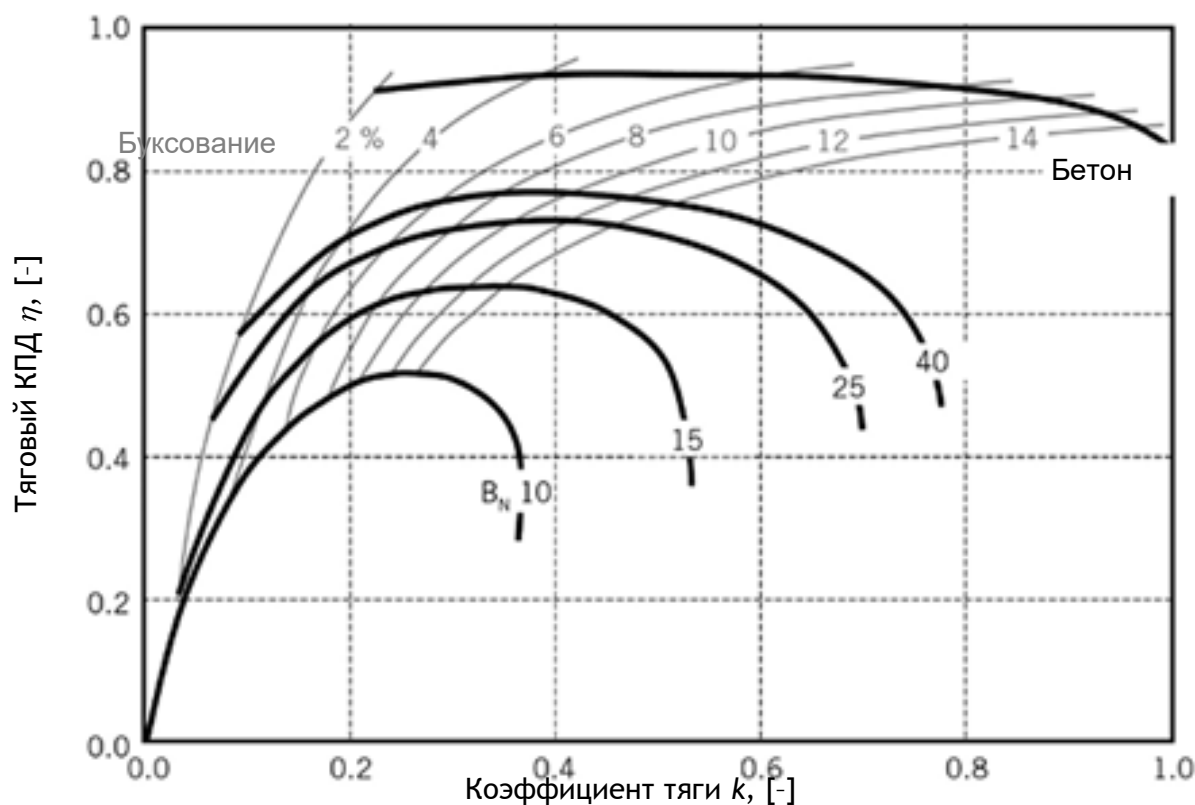


Рисунок 9 – Типичные кривые эффективности тяги для различных почв, представленные индексом проходимости B_N

Давление в шине оказывает особенно сильное влияние на сопротивление качению и буксование, поскольку определяет, в основном, площадь контакта шины с грунтом. Большая площадь контакта уменьшает удельное давление и, следовательно, как проседание (сопротивление качению), так и уплотнение (рост растений). Большая площадь контакта снижает удельное давление на грунт, увеличивает когезионное сцепление в целом и количество задействованных грунтозацепов, тем самым уменьшая пробуксовку. Различные исследования показали, что при работе на податливом грунте, доля сопротивления качению, вызванная деформацией грунта (внешнее сопротивление качению), значительно превышает долю, вызванную деформацией шины (гистерезис, внутреннее сопротивление качению) [168]. Поэтому в полевых условиях оптимальным является минимально возможное давление в шинах. Минимальный уровень давления ограничивается, с одной стороны, скоростью движения и нагрузкой на

колесо (повреждение шины) и приложенным к колесу крутящим моментом (проворачивание в ободу, повреждение борта) с другой стороны.

На рисунке 8 видно, что оптимальный тяговый КПД зависит от величины буксования или, в альтернативном представлении, от коэффициента тяги. На обоих графиках есть оптимальный диапазон. Из графиков также видно, что тяговое усилие и буксование явно зависят друг от друга в заданных условиях рабочей среды.

В достижении минимально возможного давления в шинах не только для одной оси, но и для всего трактора, важную роль играет распределение нагрузки. Коэффициент нагрузки на шину γ определяется как отношение фактической нагрузки на колесо к максимально возможной нагрузке на колесо (согласно таблице производителя) для текущего давления в шине. Целью является распределение по колесам суммарной динамической рабочей нагрузки в соответствии с грузоподъемностью шин, чтобы обеспечить одинаковое внутреннее давление во всех шинах при коэффициенте нагрузки $\gamma = 1,0$ или 100 %. Динамические нагрузки на колеса складываются из статических нагрузок на колеса трактора, включая балласт, из динамических нагрузок и из нагрузок, передаваемых от орудия. Распределение нагрузки по осям ζ определяется как отношение нагрузки на переднюю ось к нагрузке на заднюю ось. Оптимальное значение можно определить по предоставляемым производителями шин таблицам нагрузки, разделив допустимую максимальную нагрузку для шины передней оси на допустимую максимальную нагрузку для шины задней оси при одинаковом давлении, одинаковой скорости движения и, если возможно, одинаковом уровне крутящего момента (высокий крутящий момент или низкий крутящий момент). Для все коррелирующих записей в таблицах для шин передней и задней оси значение ζ будет одинаковым и поэтому оно предопределено выбором шин. При высокой степени использования шины, близкой к $\gamma = 1,0$, внутреннее давление, в первом приближении, равно давлению на поверхности контакта [150, 163] и иногда называется «низким (корректным)»

давлением. Если оптимальная нагрузка на колеса ($k=0,4$) распределяется в соответствии с рассчитанным значением ζ и устанавливается соответствующее давление в шинах, то в результате достигается минимальное давление на грунт, минимальная глубина колеи, максимальная площадь контакта и, в конечном итоге, оптимальный тяговый КПД при максимально-возможном снижении негативного воздействия колеса на почву.

Процесс решения задачи выбора наиболее энергоэффективного режима работы МТА (рисунок 10), в общем случае, можно описать в виде последовательности следующих этапов:

- определение текущих параметров работы МТА при выполнении сельскохозяйственной операции в текущих условиях;
- сопоставление значений текущих параметров работы МТА с потенциальными возможностями, обусловленными конструкцией;
- поиск возможных вариантов изменения конфигурации трактора и режима работы МТА путем комбинации изменения настроек управления в диапазонах, обеспечиваемых конструкцией машин;
- анализ возможных вариантов изменения режима работы МТА исходя из установленных критериев эффективности (повышение производительности, повышение топливной экономичности и т.п.);
- изменение комбинации настроек управления для установки выбранного варианта режима работы МТА;
- определение значений параметров работы МТА на измененном режиме и степень их соответствия желаемым результатам.



Рисунок 10 – Решение задачи выбора наиболее энергоэффективной конфигурации трактора и режима работы МТА в текущих условиях

В подавляющем числе случаев, решение задач описанного выше процесса, ложится непосредственно на оператора машинно-тракторного агрегата. Соответственно, эффективность результата обладает значительной долей субъективности и зависит от уровня компетенции оператора, его информированности, опыта работы.

На первом этапе определения текущих параметров работы МТА (в первую очередь энергетических), оператор ориентируется на информацию, полученную из показаний панели приборов и собственные субъективные ощущения (тональность звука работы двигателя, цвет и интенсивность отработавших газов двигателя, характер вибраций и т.д.). Получение этих сведений носит отрывочный, дискретный характер, поскольку требует переключения внимания с одного параметра на другой. Учитывая, что основное внимание оператор вынужден уделять контролю за соблюдением технологических требований к выполняемой операции и безопасному движению агрегата, результатом анализа, таким образом полученных, значений параметров, могут быть только нечеткие заключения о достаточности либо недостаточности энергетических возможностей

трактора для выполнения операции на выбранном скоростном режиме при заданных настройках сельскохозяйственного орудия. В первом случае оператор продолжает работу, во втором – переходит на более низкую ступень трансмиссии. При этом степень использования мощности двигателя и, как следствие, его топливная экономичность, может существенно отличаться от оптимальных значений.

Для определения возможности применения технологии SUTB (shifted up and throttled down), оператор должен сначала перейти ко второму этапу, т. е. сопоставить значение текущей потребляемой мощности с характеристикой двигателя (точка А на рисунке 6). Далее, при наличии альтернативных режимов настроек скорости вращения коленчатого вала, обеспечивающих требуемые выходные энергетические параметры при более высокой топливной эффективности, рассчитать, насколько настройки трансмиссии позволяют обеспечить требуемую скорость поступательного движения агрегата, сравнить итоговые выходные параметры возможных комбинаций настроек управления двигателем и трансмиссией и выбрать наиболее оптимальный (точка Б на рисунке 6).

При этом следует учитывать, что критерием оптимальности будет являться эмпирическое соотношение как минимум двух показателей: топливная экономичность и производительность. Дополнительно можно добавить и немаловажный фактор почвосбережения. Эмпирический характер выбора критериев оптимальности обусловлен как поставленными перед оператором задачами (тактические либо стратегические), так и уникальностью условий, в которых эти задачи необходимо решить.

Таким образом, на качество результата выбора, наиболее соответствующего текущим условиям и поставленным задачам, режима работы МТА будут влиять как адекватность предоставляемой для анализа вводной информации, так и адекватность анализа и обработки входных данных.

Практическую сложность для механизатора представляет, как процедура определения и контроля текущих параметров работы МТА, так и расчет

необходимого изменения конфигурации и режима работы трактора, что ведет к увеличению количества итераций описанной выше процедуры. Данные недостатки усугубляются необходимостью повторения процедуры при изменении вида и условий работ. Повысить эффективность принимаемых механизатором решений возможно только с помощью современных средств и методов инструментального контроля в совокупности с вычислительным устройством.

1.4 Анализ существующих методов и технических средств для определения энергетических параметров работы МТА

Мощность $N_{т.а}$, кВт, затрачиваемая машинно-тракторным агрегатом при выполнении технологических операций, определяется по формуле

$$N_{т.а} = N_{м} + N_{т.с} , \quad (8)$$

где $N_{м}$ – мощность, потребляемая сельскохозяйственной машиной, кВт;

$N_{т.с}$ – мощность, потребляемая на самопередвижение трактора, кВт.

Мощность $N_{м}$, кВт, для сельскохозяйственных машин без привода рабочих органов определяется, как произведение тягового сопротивления и поступательной скорости движения агрегата

$$N_{м} = 10^{-3} R_{м} v , \quad (9)$$

где $R_{м}$ – тяговое сопротивление сельскохозяйственной машины, Н;

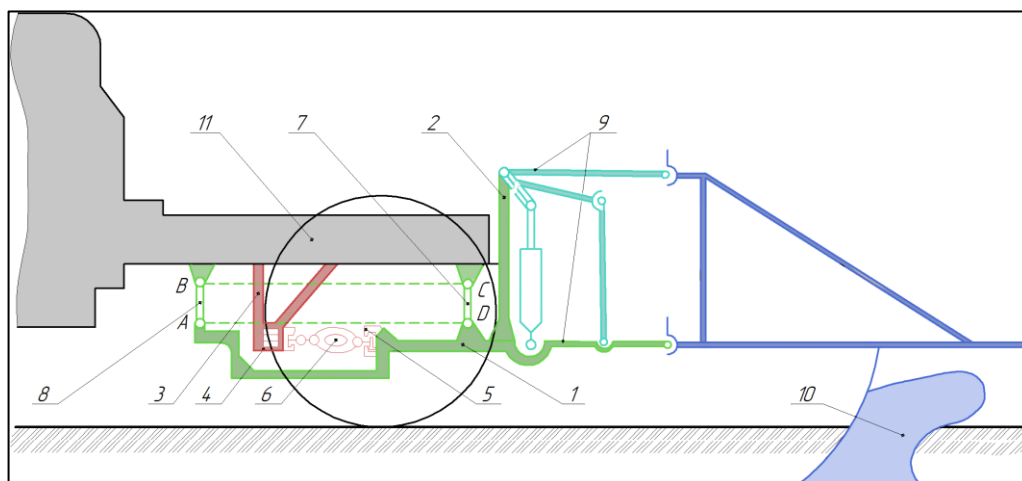
v – поступательная скорость движения сельскохозяйственной машины, м/с.

Для измерения тягового сопротивления $R_{м}$, кН, прицепных сельскохозяйственных машин можно использовать динамометр растяжения, однако, для определения тягового сопротивления полуприцепных, полунавесных и навесных сельскохозяйственных машин, трактор необходимо оборудовать

специальным устройством для преобразования сил, возникающих в продольно-горизонтальной плоскости между трактором и машиной – орудием, и приведения их результирующей к одной точке, в которой она воспринимается первичным измерительным преобразователем и регистрируется измерительной информационной системой, установленной в кабине трактора.

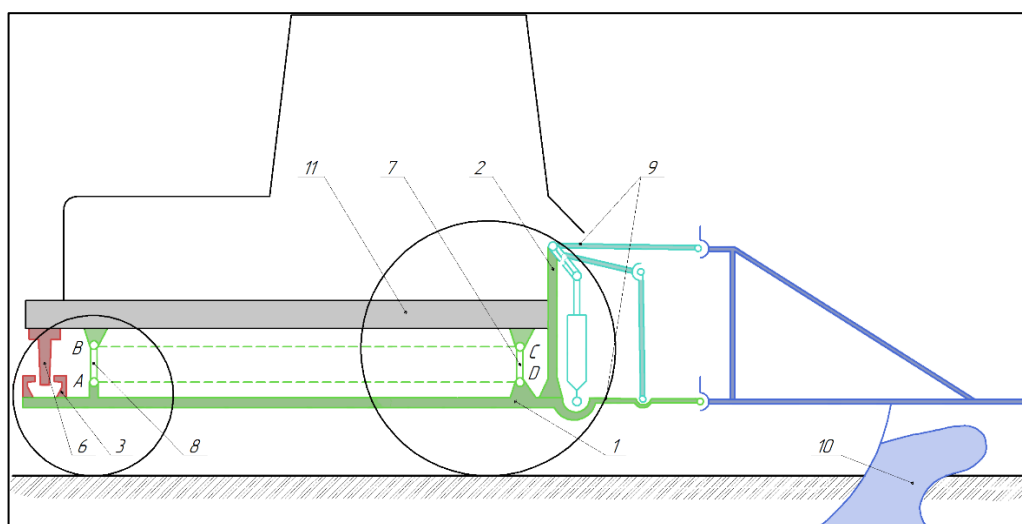
Кинематическая схема подобных устройств (рисунки 11, 12) может представлять собой маятниковый четырехзвенник ABCD, плечо AD которого является несущей подвижной рамой 1, подвешенной на задней полураме трактора BC, на заднем СД 7 и переднем АВ 8 маятниковых узлах. Несущая рама является базовым элементом, на котором крепятся кронштейны гидроцилиндров 2, подвижный замок 5 серьги первичного преобразователя силы 6, заднее навесное устройство трактора 9 с подсоединяемым к нему рабочим орудием 10. Положение нижних тяг навески (угол тяги) должно быть постоянным и параллельным поверхности опоры трактора.

К остоу рамы (задней полурамы для тракторов с шарнирно-ломающейся рамой) 11 трактора в передней ее части приваривается тягово-сцепной механизм 3, удерживающий неподвижный брус 4 с неподвижным замком серьги первичного измерительного преобразователя, устанавливаемого между подвижным и неподвижным замками.



1 – несущая рама; 2 – кронштейны цилиндров; 3 – тягово-сцепной механизм; 4 – брус; 5 – замок; 6 – первичный измерительный преобразователь; 7 – задний маятниковый узел; 8 – передний маятниковый узел; 9 – заднее навесное устройство; 10 – машина – орудие; 11 – полурама трактора задняя

Рисунок 11 – Кинематическая схема устройства для измерения тягового сопротивления машины (для тракторов нетрадиционной компоновки с шарнирно-ломающейся рамой)



1 – несущая рама; 2 – кронштейны цилиндров; 3 – тягово-сцепной механизм; 6 – первичный измерительный преобразователь консольного типа; 7 – задний маятниковый узел; 8 – передний маятниковый узел; 9 – заднее навесное устройство; 10 – машина – орудие; 11 – рама трактора

Рисунок 12 – Кинематическая схема устройства для измерения тягового сопротивления машины (для тракторов традиционной (классической) компоновки)

Поступательную скорость движения v , м/с, вычисляют по формуле

$$v = \frac{S}{t}, \quad (10)$$

где S – длина пути, пройденного сельскохозяйственным агрегатом за время измерения, м;

t – время измерения, с.

Для определения длины пути, опытный участок разбивается на необходимое количество гонов равной фиксированной длины, либо используется специальное путеизмерительное устройство. На практике, в большинстве случаев, в качестве путеизмерителя применяется «пятое колесо» – устройство, представляющее собой свободно катящееся по колесу трактора колесо, оснащенное датчиком угла поворота (рисунки 13, 14).

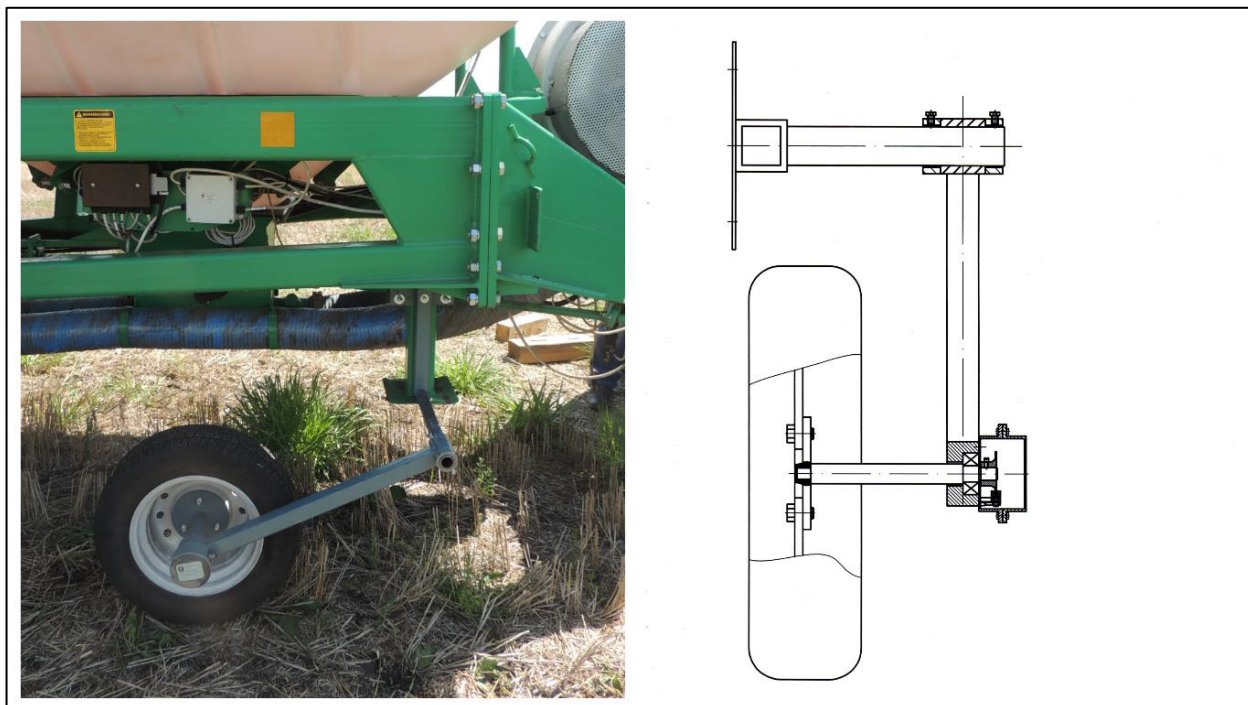
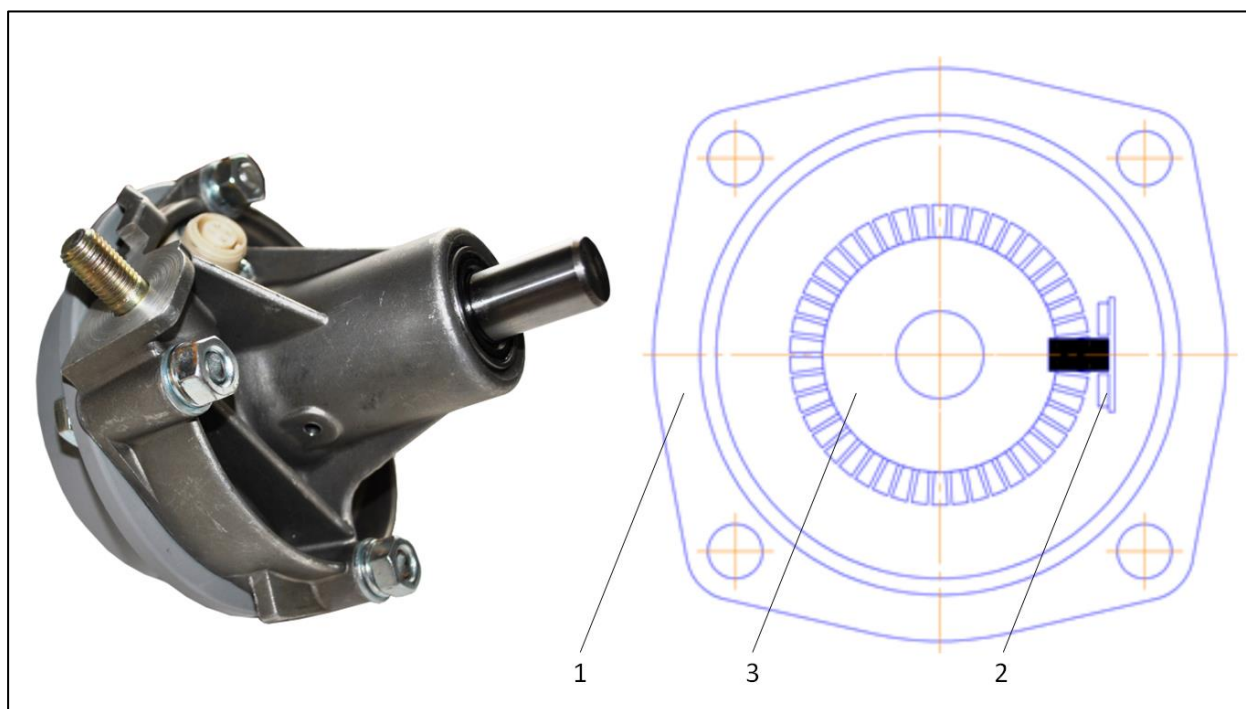


Рисунок 13 – Путеизмеритель ИП-266 разработки КубНИИТиМ



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

Рисунок 14 – Датчик угла поворота колес ИП-268 разработки КубНИИТиМ [109]

Основным элементом датчика угла поворота является диск с фрезерованными через одинаковый угол вырезами 3. Как правило, диск имеет 24 или 45 вырезов. Соответственно, точность (дискретность) датчика составляет 15° или 8° . Диск соединен гибкой муфтой со ступицей колеса и вращается вместе с ней. Корпус датчика 1 фиксируется неподвижно. Скорость вращения диска и, соответственно, колеса определяется количеством электрических импульсов за единицу времени, формируемых электронной схемой датчика при прохождении вырезов через оптическую пару 2. Электрические импульсы от датчика передаются по проводам и фиксируются в измерительной информационной системе, где измеряется их период или количество за определенный временной интервал и рассчитывается угловая скорость и частота вращения ротора датчика и, соответственно, путь, пройденный колесом [107].

Если датчики угла поворота установить на ведущие колеса трактора (рисунок 15), то предоставляется возможность определения коэффициента буксования движителей трактора [15, 17, 20, 54, 55, 70, 100, 103, 109].



Рисунок 15 – Установка датчиков угла поворота на ведущие колеса тракторов.

В этом случае, коэффициент буксования δ , %, вычисляется по формуле

$$\delta = \frac{1}{n_{\text{в.д.}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{в.д.}}} \left(1 - K_i \frac{I_s}{I_i} \right) 10^2, \quad (11)$$

где $n_{\text{в.д.}}$ – количество ведущих движителей;

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.

Для сельскохозяйственных машин с активными рабочими органами с приводом от ВОМ трактора или гидравлическим приводом, формула (8) примет вид

$$N_m = 10^{-3} Rv + 1,047 \cdot 10^{-4} M_{\text{ВОМ}} n_{\text{ВОМ}}, \quad (12)$$

$$N_m = 10^{-3} Rv + \Delta p Q_{\text{ж}}, \quad (13)$$

где $M_{\text{ВОМ}}$ – крутящий момент на хвостовике ВОМ, Н·м;

$n_{\text{ВОМ}}$ – частота вращения хвостовика ВОМ, мин⁻¹;

Δp – перепад давлений между входящей и выходящей гидравлическими линиями привода, МПа;

$Q_{\text{ж}}$ – расход рабочей жидкости, дм³/с.

Мощность $N_{\text{т.с}}$ можно определить как

$$N_{\text{т.с}} = 10^{-3} R_{\text{т.с}} v + N_{\text{б}} + N_{\text{м.п}}, \quad (14)$$

где $R_{\text{т.с}}$ – тяговое сопротивление, оказываемое трактором, при его буксировании с поступательной скоростью v , Н;

$N_{\text{б}}$ – мощность, необходимая на преодоление буксования движителей трактора при тяговом усилии на крюке $R_{\text{м}}$, кВт;

$N_{\text{м.п}}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление механических потерь в трансмиссии трактора, кВт.

Также, если обеспечить возможность буксирования всего МТА при выполнении технологического процесса, общую мощность $N_{\text{т.а}}$ можно определить, как

$$N_{\text{т.а}} = 10^{-3} v (R_{\text{т.а}} - R_{\text{т.с}}) + N_{\text{б}} + N_{\text{м.п}}, \quad (15)$$

где $R_{\text{т.а}}$ – тяговое сопротивление, оказываемое агрегатом, при его буксировании с поступательной скоростью v , Н.

Для определения крутящего момента на ВОМ, трактор необходимо оборудовать специализированным датчиком-преобразователем крутящего момента (рисунок 16) [130].



Рисунок 16 – Датчик-преобразователь крутящего момента на ВОМ тракторов модель 425 PTO производства фирмы Datum Electronics Limited

Практическую сложность при определении мощности трактора по формулам (14), (15), представляет измерение мощности, необходимой для преодоления буксования $N_{\text{б}}$, кВт, и мощности механических потерь $N_{\text{м.п}}$, кВт

$$N_{\text{м.п}} = \frac{N_{\text{в.к}}(1 - \eta_{\text{в.к}})}{\eta_{\text{в.к}}} + \frac{N_{\text{ВОМ}}(1 - \eta_{\text{ВОМ}})}{\eta_{\text{ВОМ}}} + \frac{N_{\text{г}}(1 - \eta_{\text{г}})}{\eta_{\text{г}}}, \quad (16)$$

$$N_{\text{б}} = 0,01N_{\text{в.к}}\delta, \quad (17)$$

где $N_{\text{ВОМ}}$ – мощность на привод машины от ВОМ, кВт;

$N_{\text{г}}$ – мощность на привод машины от гидросистемы трактора, кВт;

$N_{\text{в.к}}$ – мощность на ведущих органах движителя, кВт;

$\eta_{\text{ВОМ}}, \eta_{\text{г}}, \eta_{\text{в.к}}$ – КПД механических потерь в трансмиссии привода от двигателя к ВОМ, насосу гидросистемы и полуосям ведущих колес соответственно.

Мощность на привод машины от ВОМ $N_{\text{ВОМ}}$, кВт, рассчитывается по формуле

$$N_{\text{ВОМ}} = 1,047 \cdot 10^{-4} M_{\text{ВОМ}} n_{\text{ВОМ}}, \quad (18)$$

$n_{\text{ВОМ}}$ – частота вращения ВОМ, мин⁻¹.

Мощность на привод машины от гидросистемы трактора $N_{\text{г}}$, кВт, рассчитывается аналогично формуле (18) при измерении крутящего момента на приводе гидронасоса трактора.

Мощность на ведущих органах движителя $N_{\text{в.к}}$, кВт, рассчитывается аналогично формуле (18) при измерении крутящего момента на полуосях ведущих колес.

Стандарт [29] допускает определение мощности $N_{\text{т.с}}$, кВт, по зависимости эксплуатационной мощности двигателя трактора $N_{\text{экс}}$, кВт, полученной при определении его регуляторной характеристики по ГОСТ 7057 [27] и ГОСТ 18509 [23] от часового расхода топлива по формуле

$$N_{\text{т.с}} = N_{\text{экс}}(G_{\text{ТХХ}}, n_{\text{д}}), \quad (19)$$

где $G_{\text{ТХХ}}$ – часовой расход топлива, определенный при движении трактора с поступательной скоростью v без сельскохозяйственной машины, кг/ч;

$n_{\text{д}}$ – частота вращения коленчатого вала двигателя трактора, мин⁻¹.

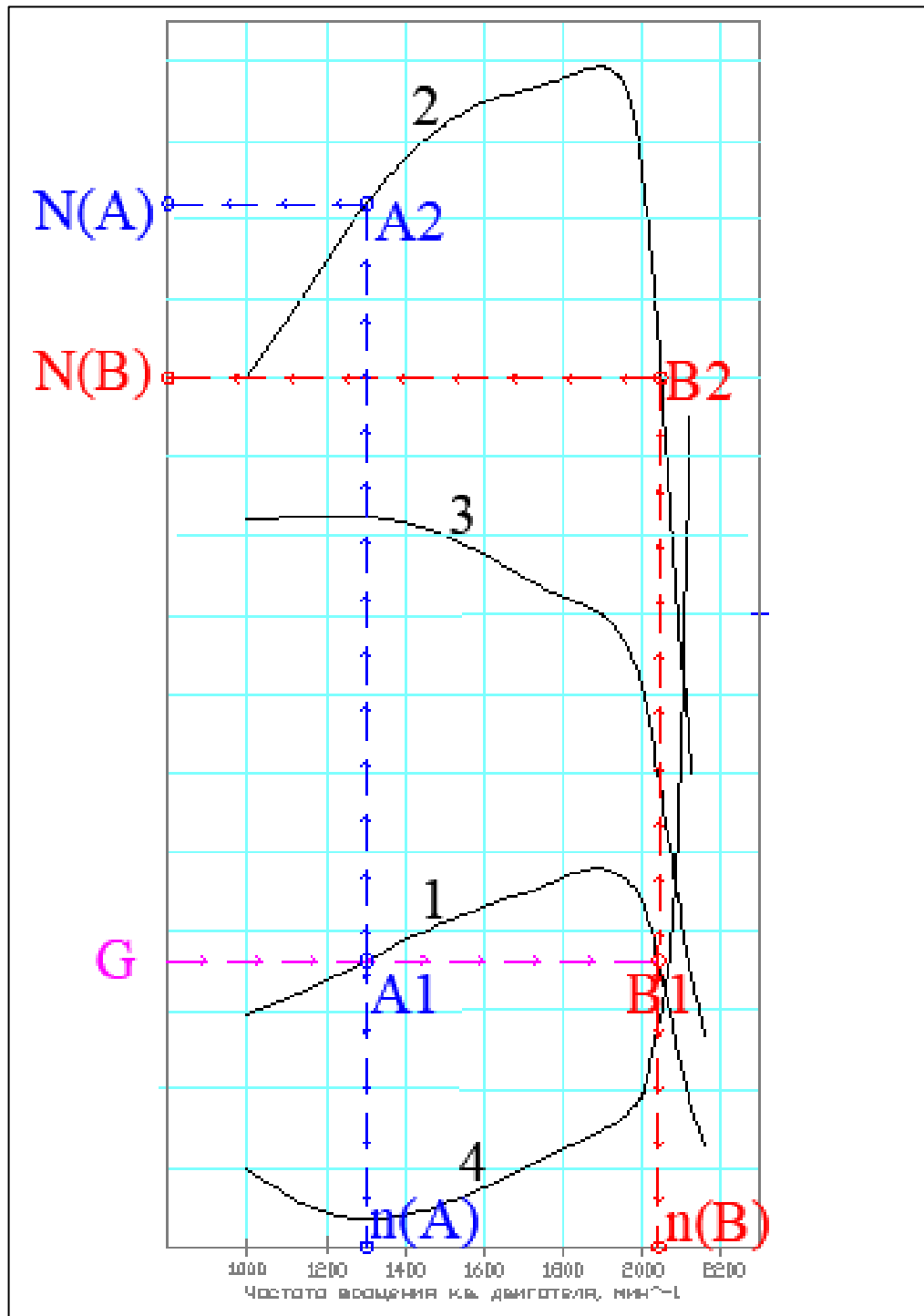
Для этого, на графике, полученном при определении регуляторной характеристики двигателя трактора (рисунок 17), из точки G, соответствующей расходу топлива $G_{\text{ТХХ}}$, кг/ч, параллельно оси абсцисс откладывается луч до пресечения с кривой графика расхода топлива. В случае, если луч пересекает график в 2-х точках (точки A1 и B1 на рисунке 17), выбирается та из них, которая соответствует измеренной во время опыта частоте вращения коленчатого вала двигателя $n_{\text{д}}$ (точка п(A) или точка п(B) на рисунке 17), далее из этой точки,

параллельно оси ординат, откладывается луч до пересечения с графиком эксплуатационной мощности (точка A2 или B2 на рисунке 17). Значение ординаты этой точки ($N(A)$ или $N(B)$ на рисунке 17) принимается равным мощности на самопередвижение $N_{т.с}$ трактора.

Аналогичным образом, ГОСТ Р 52777 [29] допускает определение мощности $N_{т.а}$, кВт, затрачиваемой машинно-тракторным агрегатом при выполнении технологических операций. В этом случае, формула (19) примет вид

$$N_{т.а} = N_{\text{экс}}(G_{та}, n_d), \quad (20)$$

где $G_{та}$ – часовой расход топлива, определенный при выполнении агрегатом технологического процесса с поступательной скоростью v , кг/ч.



1 – график расхода топлива двигателя в функции частоты вращения к.в.; 2 – график эксплуатационной мощности двигателя в функции частоты вращения к.в.; 3 – график крутящего момента в функции частоты вращения к.в.; 4 – график удельного расхода топлива в функции частоты вращения к.в.

Рисунок 17 – Определение мощности $N_{Т.С}$ по зависимости эксплуатационной мощности двигателя трактора $N_{эксп}$, полученной при определении его регуляторной характеристики от часового расхода топлива

Тяговое сопротивление машины R_m , Н, можно вычислить по формуле

$$R_m = \frac{(N_{т.а} - N_{т.с} - N_{ВОМ} - N_{Г})}{v} 10^3, \quad (21)$$

где $N_{ВОМ} = N_{эксп}(G_{ТВОМ}, n_d)$ – мощность, потребляемая на привод рабочих органов от ВОМ трактора, кВт;

$N_{Г} = N_{эксп}(G_{ТГ}, n_d)$ – мощность, потребляемая на привод рабочих органов от гидросистемы трактора, кВт;

$G_{ТВОМ}$ – расход топлива, измеренный при выполнении технологического процесса рабочими органами с приводом от ВОМ при скорости поступательного движения агрегата $v = 0$, кг/ч;

$G_{ТГ}$ – расход топлива, измеренный при выполнении технологического процесса рабочими органами с приводом от гидросистемы трактора при скорости поступательного движения агрегата $v = 0$, кг/ч;

Следует отметить, что мощность на самопередвижение трактора $N_{т.с}$, кВт, определенная по методу измерения расхода топлива по формуле (19) не учитывает мощности потерь на буксование $N_б$, кВт, поскольку при холстом (без нагрузки на тягово-сцепном устройстве трактора) проезде, буксование ведущих движителей пренебрежимо мало и принимается равным нулю. Это соответственно вносит дополнительную погрешность при определении тягового сопротивления сельскохозяйственной машины по формуле (21), однако методика [29] данной погрешностью пренебрегает.

Часовой расход топлива G_T , измеряется расходомером (рисунки 18, 19, 20), предварительно установленным на трактор и определяется по формуле

$$G_T = 3,6 \frac{V_T \rho}{t}, \quad (22)$$

где V_T – объем топлива, израсходованного двигателем трактора за время измерения, см^3 ;

ρ – плотность топлива при стандартной температуре, г/см^3 ;

t – время измерения, с.



1 – датчик расходомера; 2 – электронный блок регистрации сигналов датчика

Рисунок 18 – Однопоточный расходомер топлива ИП-179 разработки КубНИИТиМ



1 – датчик расходомера; 2 – электронный блок регистрации сигналов датчика

Рисунок 19 – Однопоточный расходомер топлива ИП-204 разработки КубНИИТиМ

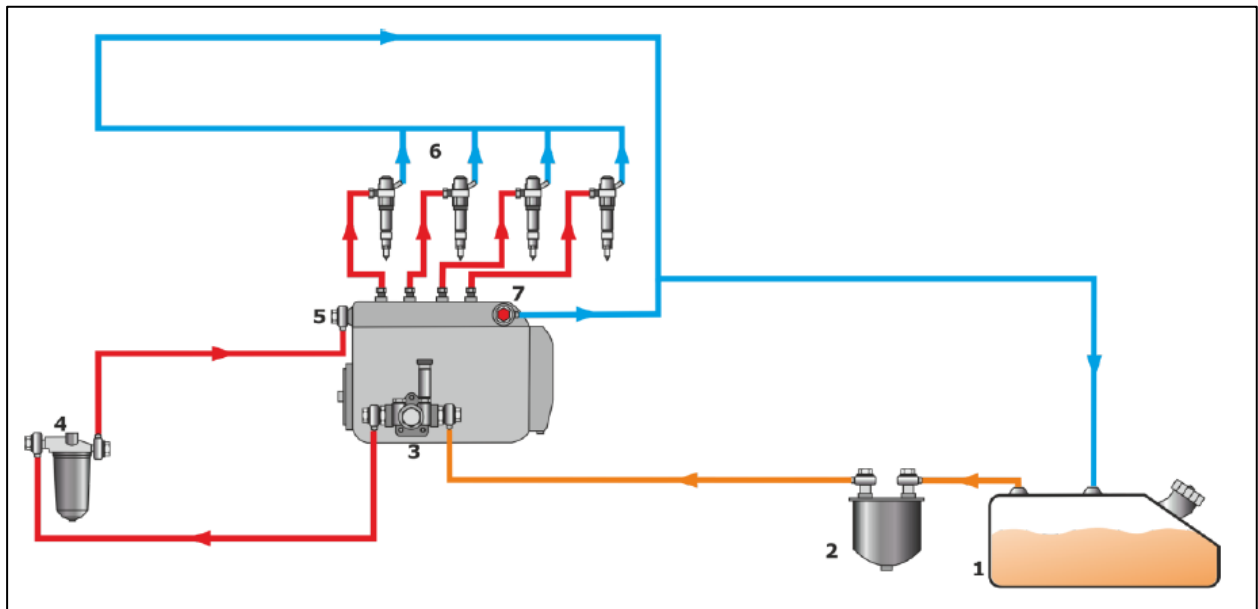


1 – датчик расходомера; 2 – электронный блок регистрации сигналов датчика;

3 – теплообменник

Рисунок 20 – Двухпоточный дифференциальный расходомер топлива ИП-260 разработки КубНИИТиМ

Для целей энергетической оценки применяются объемные расходомеры проточного типа [108], которые встраиваются в топливную магистраль системы питания двигателя (рисунок 21). Системы питания современных дизельных двигателей довольно широко варьируются по конструкции, параметрам работы и т.п., но все они представляют из себя отдельную топливную аппаратуру, состоящую из систем низкого и высокого давления. Система низкого давления включает в себя топливный бак 1, фильтры предварительной 2 и тонкой 4 очистки топлива, ТННД 3 и топливопроводы низкого давления. Система высокого давления состоит из топливного насоса высокого давления 5, форсунок 6 и топливопроводов высокого давления. В топливных аппаратах с насос-форсунками система высокого давления объединена в один корпус для каждого цилиндра, а в системах типа «Common Rail» в топливную систему высокого давления, между ТНВД и форсунками включен еще один элемент – топливная рампа.



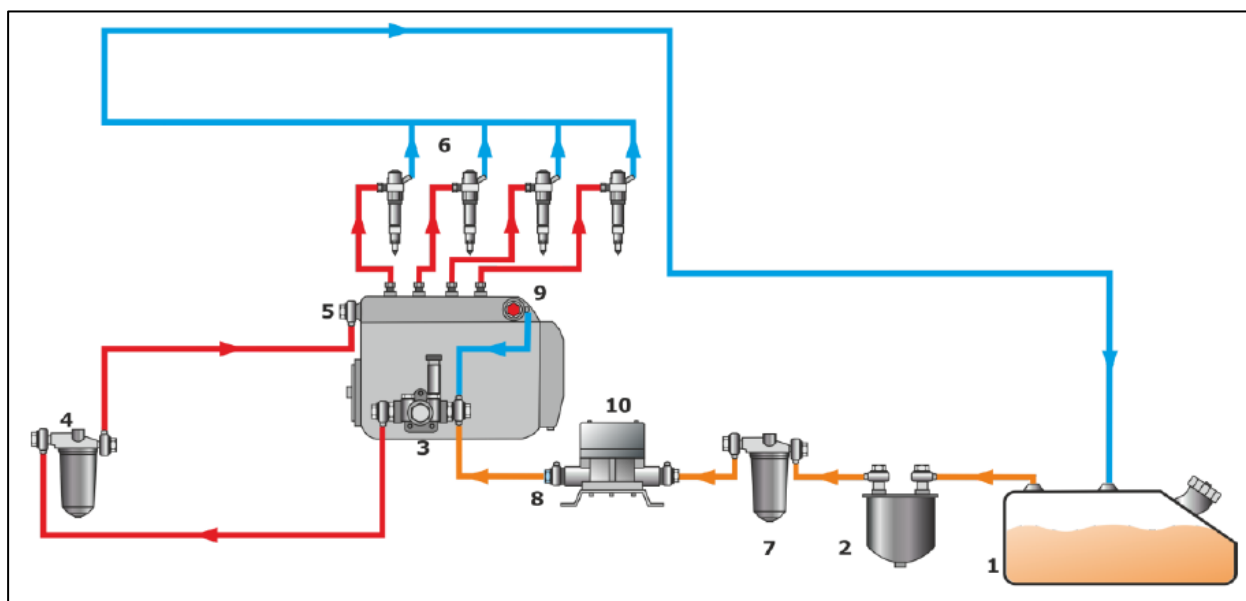
- 1 – топливный бак; 2 – фильтр грубой очистки топлива;
 3 – топливный насос низкого давления; 4 – фильтр тонкой очистки топлива;
 5 – топливный насос высокого давления; 6 – форсунки

Рисунок 21 – Система питания дизельного двигателя

Топливо из бака 1 по трубопроводам и через фильтр предварительной очистки топлива 2, топливным насосом низкого давления 3 подается по топливопроводу к фильтру тонкой очистки топлива 4, а из него – в питающую полость насоса высокого давления 5, затем по трубопроводу высокого давления в форсунку 6, а из форсунки впрыскивается в камеру сгорания. Топливный насос низкого давления качает на вход топливного насоса высокого давления значительно больший объем топлива, чем расходуется в любом из режимов работы двигателя, поэтому избыток топлива из питающей полости ТНВД и после форсунок по топливопроводу направляется обратно в топливный бак.

Для измерения расхода топлива однопоточным расходомером необходимо обеспечить, чтобы через измерительный датчик протекал только тот объем топлива, который потребляется двигателем. Для выполнения данного условия требуется изменение стандартной схемы топливоподачи. Имеется два возможных варианта установки однопоточного расходомера: установка «на разрежение» и установка «на давление».

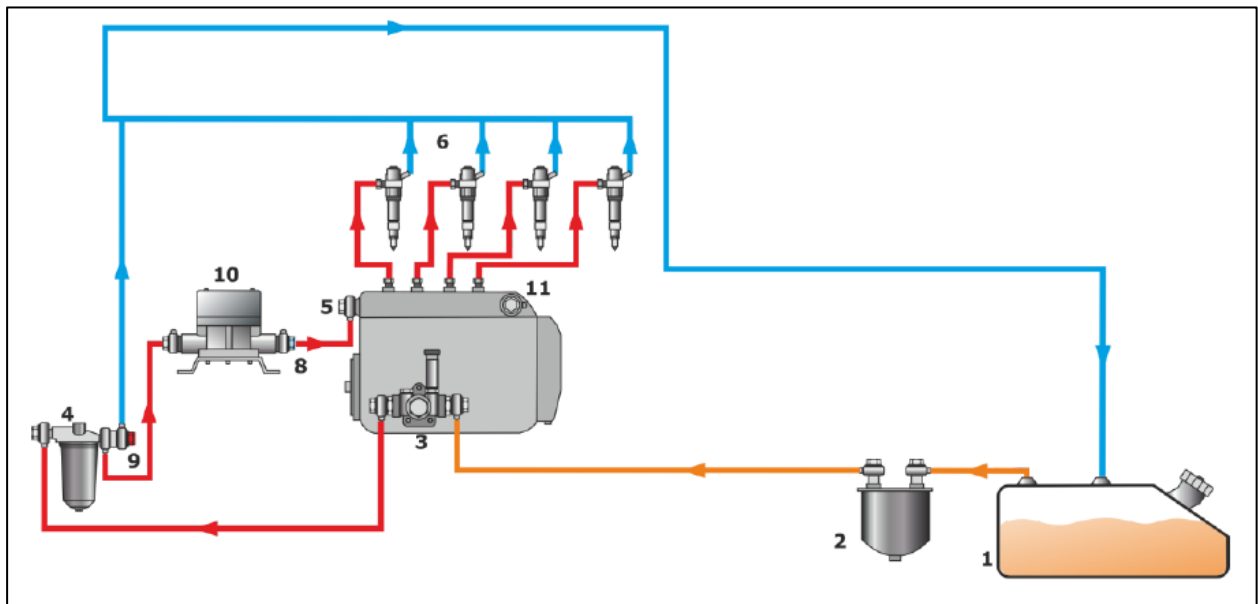
При установке расходомера топлива «на разрежение» (рисунок 22), используется участок топливопровода между фильтром предварительной очистки и входом топливного насоса низкого давления, а для предотвращения измерения объема топлива, возвращаемого в бак, схема обратного трубопровода изменяется таким образом, что излишки топлива из питающей полости ТНВД подаются на вход ТННД. Исключением из измерения излишков топлива после форсунок обычно пренебрегают, считая, что на исправных форсунках, объем топлива, сливаемого в бак, не превышает 0,1 % от общего расхода топлива. Кроме того, для обеспечения работы такой измененной топливной системы, на выходе ТНВД необходимо установить перепускной клапан 9, позволяющий поддерживать рабочее давление в питающей полости ТНВД. А на выходе расходомера – обратный клапан 8, который должен предотвратить протекание топлива через расходомер в обратном направлении и снизить влияние гидроудара на работу расходомера.



- 1 – топливный бак; 2 – фильтр предварительной очистки топлива; 3 – топливный насос низкого давления; 4 – фильтр тонкой очистки топлива; 5 – топливный насос высокого давления; 6 – форсунки; 7 – дополнительный фильтр тонкой очистки; 8 – обратный клапан; 9 – перепускной клапан; 10 – расходомер

Рисунок 22 – Схема установки расходомера «на разрежение»

Для установки однопоточного расходомера «на давление» в топливную систему двигателя (рисунок 23), необходимо использовать участок топливопровода между фильтром тонкой очистки и входом ТНВД. Обратная топливная магистраль ТНВД при этом необходимо также изменить на циркуляцию по малому кругу, однако в этом случае, обратная магистраль с выхода ТНВД переносится на выход из фильтра тонкой очистки топлива, а на выход из ТНВД устанавливается заглушка. Для обеспечения работоспособности топливной системы с такими изменениями, на выход фильтра тонкой очистки топлива необходимо поставить перепускной клапан, отрегулированный таким образом, чтобы он поддерживал постоянное необходимое давление на участке «фильтр тонкой очистки – вход топливного насоса высокого давления». Как и в случае установки «на разрежение», на выход расходомера нужно также установить обратный клапан, а излишки топлива после форсунок не исключаются.



1 – топливный бак; 2 – фильтр предварительной очистки топлива; 3 – топливный насос низкого давления; 4 – фильтр тонкой очистки топлива; 5 – топливный насос высокого давления; 6 – форсунки; 7 – дополнительный фильтр тонкой очистки; 8 – обратный клапан; 9 – перепускной клапан; 10 – расходомер; 11 – заглушка

Рисунок 23 – Схема установки расходомера «на давление»

Как видно, оба описанных варианта подключения требуют существенного изменения штатной схемы топливоподачи двигателя, что приводит к:

- повышению нагрузки на топливный насос низкого давления;
- ухудшению охлаждения топливного насоса высокого давления;
- нарушению температурного режима топлива (топливо в баке не подогревается, а в питающей полости топливного насоса высокого давления наоборот, излишне нагревается, что в первом случае критически влияет на работоспособность трактора при низких температурах окружающей среды, а во втором – приводит к снижению мощности двигателя);
- нарушению режима удаления паровоздушной смеси из топливной магистрали и питающей полости топливного насоса высокого давления, что приводит к снижению мощности, повышению неравномерности либо полному прекращению работы двигателя, ускорению выхода из строя деталей топливной аппаратуры и кривошипно-шатунного механизма двигателя.

Кроме того, установка расходомеров по данным схемам подключения невозможна на топливные системы типа «Common Rail» и, в большинстве случаев, на топливные системы с насос-форсунками.

Более предпочтительным вариантом является установка двух расходомеров: один на подающую магистраль системы питания двигателя, а второй – на сливную. В этом случае, расход топлива, потребленного двигателем будет рассчитываться как разница между количеством топлива, прошедшим через расходомер, установленный на подающей топливной магистрали и количеством топлива, вернувшимся в топливный бак через расходомер, установленный на сливной магистрали топливной системы и формула (22) примет вид

$$G_T = 3,6 \frac{(V_1 - V_2)\rho}{t}, \quad (23)$$

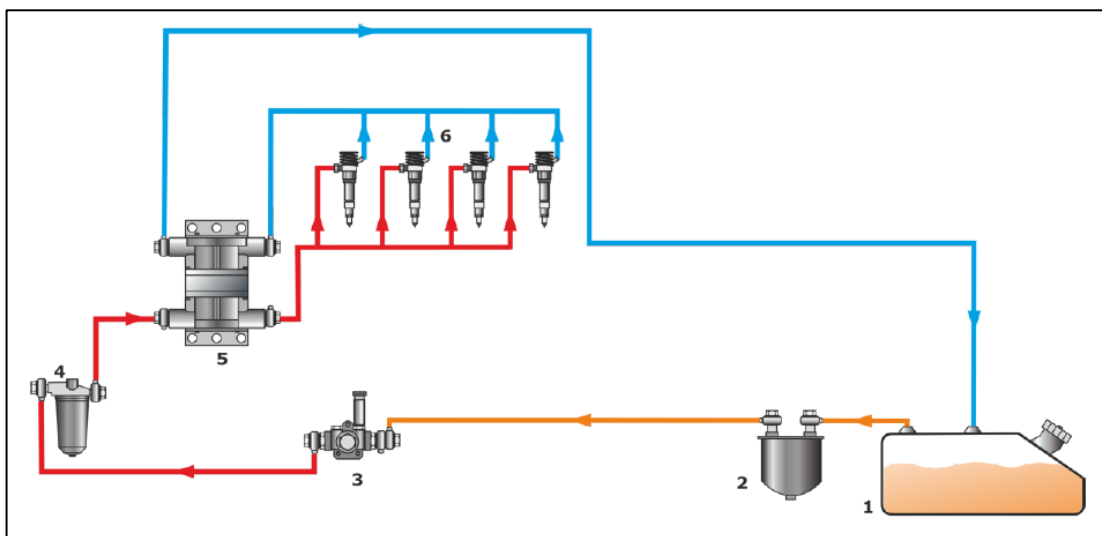
где t – время измерения, с;

V_1 и V_2 – объем топлива, прошедшего через подающую и сливную магистрали соответственно, за время измерения, см³;

ρ – плотность топлива при стандартной температуре, г/см³.

Зачастую, два расходомера (на подающую и сливную магистраль) объединяют в одном корпусе, такие расходомеры называют двухпоточными или дифференциальными (рисунок 20). Схемы установки в этом случае, также могут быть «на давление» или «на разрежение» (рисунки 24, 25). Эти схемы установки актуальны и для варианта с двумя однопоточными расходомерами и для варианта с одним двухпоточным (дифференциальным) расходомером. Различие заключается в месте подключения «подающего» расходомера («подающей» секции двухпоточного расходомера), «сливной» же расходомер («сливная» секция двухпоточного расходомера) всегда устанавливается на участке сливной магистрали «выход ТНВД – топливный бак». Вариант установки «на давление» применяется для установки в топливную систему с насос-форсунками, вариант

«на разрежение» - только для установки в топливную систему типа «Common Rail»

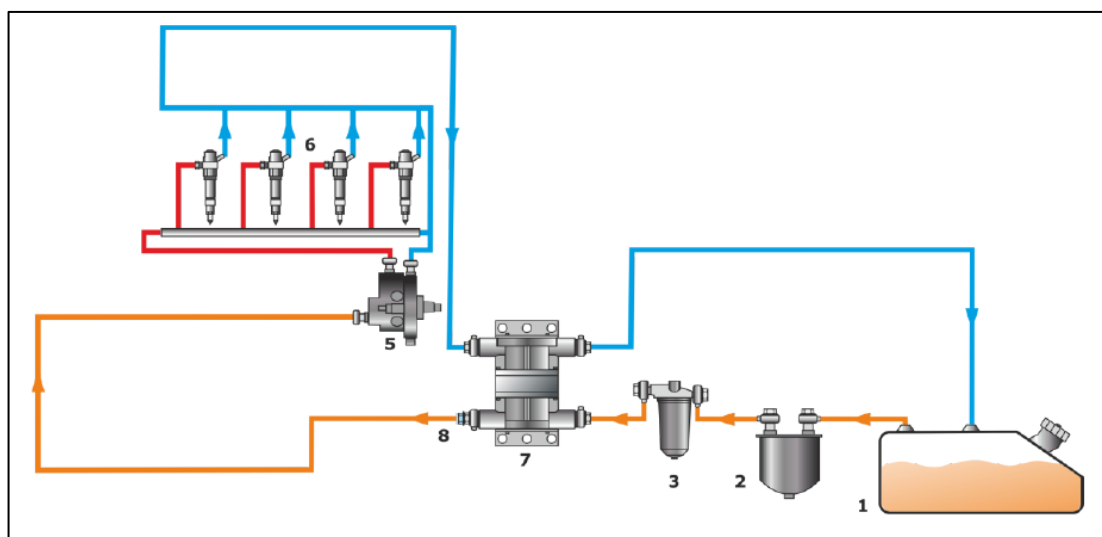


1 – топливный бак; 2 – фильтр предварительной очистки топлива;

3 – топливный насос низкого давления; 4 – фильтр тонкой очистки топлива;

5 – двухпоточный (дифференциальный) расходомер; 6 – насос-форсунки

Рисунок 24 – Схема установки двухпоточного (дифференциального) расходомера «на давление» в топливную систему с насос-форсунками



1 – топливный бак; 2 – фильтр предварительной очистки топлива; 3 – фильтр тонкой очистки топлива; 5 – топливный насос высокого давления; 6 – форсунки;

7 – двухпоточный (дифференциальный) расходомер; 8 – обратный клапан

Рисунок 25 – Схема установки двухпоточного (дифференциального) расходомера «на разрежение» в топливную систему типа «Common Rail»

При установке двух однопоточных (либо одного двухпоточного) расходомеров, поскольку не изменяется штатная схема топливной магистрали двигателя, снижаются дополнительные нагрузки на топливный насос, не изменяются штатные температурные режимы топлива и деталей топливной аппаратуры, не происходит «завоздушивания» топливной магистрали паровоздушной смесью, однако и этот способ измерения расхода топлива имеет существенные недостатки и ограничения:

1) топливо, проходящее через «подающий» расходомер (секцию дифференциального расходомера) и через «сливной» расходомер (секцию дифференциального расходомера) имеет разницу в температурах, которая, в определенных условиях, может достигать 50 °С и более. Соответственно, при значении температурного коэффициента теплового расширения $0,0012 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, ошибка в расчетах разности в объеме топлива прошедшем через «подающий» и «сливной» расходомеры может достигать 6 % и более. При обычной, для двигателей сельскохозяйственных тракторов, производительности топливных насосов 200-300 л/ч эта ошибка может превышать 12-18 л/ч. Для решения данной проблемы, могут устанавливаться дополнительные теплообменники 3 (рисунок 13), назначением которых является снижение разницы в температурах топлива поступающего на вход «подающего» и «сливного» расходомеров, измерение температуры топлива в измерительной камере расходомеров и внесение соответствующих поправок в расчет и т.п.;

2) при установке двух расходомеров, соответственно в 2 раза увеличивается погрешность определения количества топлива, израсходованного двигателем.

Все перечисленные особенности, связанные с установкой и эксплуатацией расходомеров на тракторы, существенно ограничивают, и в определенных случаях делают невозможным определение мощности $N_{\text{т.а}}$, кВт, и составляющих мощностного баланса МТА по формулам (19), (20) и (21).

Таким образом, можно выделить три основных существующих метода определения энергетических параметров работы машинно-тракторных агрегатов:

1) Метод тензометрирования. Этот метод устанавливает определение показателей тягового и мощностного балансов МТА прямым измерением. На текущий момент этот метод является самым точным и предоставляет возможность получения наиболее полной кинематически-силовой картины работы МТА, с теоретически неограниченным уровнем поэлементной детализации. Это единственный из перечисленных методов, позволяющий определять не только усредненные, но и мгновенные значения измеряемых параметров без потери точности. Однако практическое применение данного метода ограничено сложностью и стоимостью переоборудования энергосредства, которая может превысить стоимость самого трактора.

2) Метод буксирования. Этот метод устанавливает определение среднего тягового сопротивления машины и предполагает наличие трактора – «тягача». Несмотря на кажущуюся доступность с технической точки зрения, этот метод довольно редко применяется в чистом виде, поскольку обладает низкой точностью, информативностью и детализацией процесса, не позволяет в точности воспроизвести тягово-динамическую картину самостоятельной работы МТА при выполнении технологических операций.

3) Определение показателей по расходу топлива. Этот метод устанавливает определение средней за опыт реализуемой мощности двигателя трактора при выполнении технологического процесса по фактическому расходу топлива и предусматривает наличие конкретной для используемого двигателя зависимости между расходом топлива и мощностью двигателя. До недавнего времени этот метод был наиболее широко распространен в случаях, когда не требуется определение динамического характера изменения составляющих тягово-мощностного баланса машинно-тракторных агрегатов, однако, со все большим распространением электронно-управляемых топливных систем типа «Common Rail» и систем с насос-форсунками, возможность применения данного метода стала ограничиваться.

На практике, в исследовательских целях и целях испытаний, в зависимости от поставленных задач, технических и финансовых возможностей, применяются

комбинации из перечисленных трех основных методических подходов, однако для решения задачи определения в режиме реального времени нагрузочного и скоростного режима работы двигателя МТА, степени и потенциала использования его мощности, не подходит ни один из этих методов, методы расхода топлива и буксирования – в силу невозможности определения мгновенных значений и динамической составляющей измеряемых параметров, а метод тензометрирования – по причине сложности и высокой стоимости.

1.5 Выводы по главе

1. Высокая энергонасыщенность современных сельскохозяйственных тракторов, с одной стороны, способствует расширению спектра их применения, повышает их универсальность и производительность, а с другой – зачастую приводит к ухудшению топливно-экономических показателей работы МТА по причине недозагрузки двигателя и предъявляет повышенные требования к обеспечению тягово-сцепных качеств ходовой системы. Ухудшения топливной экономичности можно избежать с помощью манипуляций частотой вращения коленчатого вала двигателя и передаточным отношением трансмиссии, а тягово-сцепные качества обеспечиваются за счет рациональной баллаستировки и установки оптимального давления в шинах трактора.

2. Необходимость выполнения всего комплекса сельскохозяйственных работ с соответствующим качеством и в установленные агротехнические сроки в условиях с широко изменяющимися характеристиками (размер и сложность конфигурации участка, длина гона, макро- и микрорельеф, плотность и влажность почвы и т.д.), требует постоянного изменения режима работы МТА и конфигурации трактора, для наиболее эффективного использования тягово-сцепных свойств и энергетического потенциала обеспеченных конструкцией трактора.

3. Для наиболее полного использования тягово-сцепных свойств и энергетического потенциала, заложенных в конструкции трактора,

производители активно разрабатывают и внедряют в новые модели вспомогательные и автоматические функции для комплексной оптимизации режимов работы, однако для большинства тракторов, находящихся в эксплуатации, они не доступны. Это приводит к повышенному расходу топлива, негативному воздействию движителей на почву, увеличению вредных выбросов в атмосферу и, в конечном счете снижению урожайности и увеличению себестоимости производства сельскохозяйственной продукции.

4. Выбор наиболее энергоэффективной конфигурации трактора и режима работы МТА в текущих условиях, является довольно сложной задачей, решение которой ложится непосредственно на оператора МТА. Решение этой задачи можно представить в виде трех основных этапов, первым из которых является определение текущих целевых показателей работы агрегата (степень использования мощности двигателя, фактическая производительность выполняемой операции и соответствие тягово-сцепных свойств ходовой системы выполняемой операции), вторым – расчет возможных комбинаций изменения конфигурации и настроек режима работы и, в заключении – решение задачи оптимизации и выбор наиболее соответствующего стратегической задаче варианта.

5. Качественное решение задачи определения текущих целевых показателей работы МТА невозможно без применения эффективных методов и средств инструментального контроля. Методы и средства определения энергетических параметров работы МТА, применяющиеся для исследований и испытаний сельскохозяйственной техники, характеризуются высокой точностью, однако, в силу многих причин не применимы при длительной эксплуатации в реальных условиях.

6. Для выбора наиболее энергоэффективной конфигурации трактора и режима работы агрегата, оператор должен иметь широкие компетенции, владеть значительным математическим и аналитическим аппаратом. Соответственно, качество результата обладает значительной долей субъективности и зависит от уровня компетенции оператора, его информированности и опыта работы.

1.6 Цели и задачи исследования

1. Исследовать и обосновать инструменты контроля и оптимизации использования мощности двигателя трактора при выполнении сельскохозяйственных работ в производственных условиях.

2. Теоретически исследовать и обосновать метод и средства контроля скорости движения и буксования движителей трактора при выполнении сельскохозяйственных работ.

3. Экспериментально исследовать и обосновать параметры системы повышения энергоэффективности машинно-тракторных агрегатов.

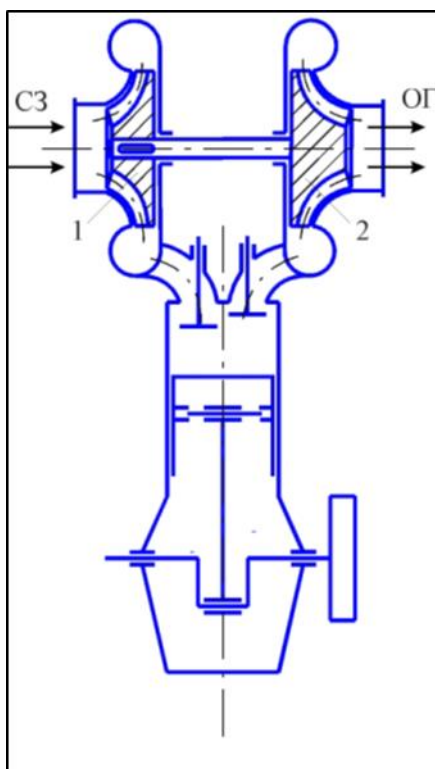
4. Разработать, изготовить и испытать экспериментальный образец телеметрической системы.

5. Провести технико-экономическую оценку применения телеметрической системы повышения энергоэффективности машинно-тракторных агрегатов в производственных условиях.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

2.1 Обоснование и математическое моделирование метода инструментального контроля степени использования мощности двигателя

Тенденция развития автотракторных двигателей характеризуется увеличением их суммарной мощности и КПД, снижением их удельного расхода топлива и масла, снижением токсичности металла и выхлопных газов, повышением надежности и долговечности. Этим объясняется широкое применение дизелей с газотурбинным наддувом, имеющим промежуточное охлаждение воздуха, поступающего в цилиндры, для повышения наполнения их воздухом [56]. Принципиальная схема двигателя с газотурбинным наддувом приведена на рисунке 26.



1 – колесо компрессора; 2 – колесо турбины

Рисунок 26 – Принципиальная схема двигателя с газотурбинным наддувом:

При реализации такой схемы наддува энергия выпускных газов используется для привода колеса турбины, установленного на одном валу с колесом компрессора (нагнетателя). Таким образом, ротор турбокомпрессора вращается с высокой частотой, обеспечивая сжатия и подачу воздуха в цилиндр двигателя. Так как ротор турбокомпрессора при такой схеме кинематически не связан с коленчатым валом, количество подаваемого компрессором воздуха с изменением нагрузки на двигатель тоже изменяется.

Поскольку газовая турбина и нагнетатель имеют с двигателем лишь газовую связь, мощность турбины N_T , кВт, на любом из установившихся режимов работы равна мощности, расходуемой на привод компрессора N_K , кВт, а степень понижения давления газов в турбине Π_T , кПа, и степень повышения давления газов в компрессоре Π_K , кПа, взаимосвязаны [118]

$$\Pi_K^{\frac{k-1}{k}} = 1 + \beta\tau \left[1 - \left(\frac{1}{\Pi_T} \right)^{\frac{k_T-1}{k_T}} \right], \quad (24)$$

где k, k_T – отношение теплоемкостей свежего заряда и выпускных газов соответственно (переменная величина, зависящая от температуры рабочего тела T , доли выгоревшего воздуха x и коэффициента избытка воздуха α $k = \Phi(T, x, \alpha)$;

β – параметр, определяемый теплофизическими свойствами k и R (газовая постоянная) свежего заряда и выпускных газов;

τ – тактность двигателя (2 или 4).

Таким образом, давление наддува p_K , характеризуется наличием устойчивой, для данного двигателя, связью с одним из базовых показателей производительности двигателя внутреннего сгорания – средним эффективным давлением p_e , МПа. Среднее эффективное давление является виртуальным показателем и характеризует значение давления в цилиндре двигателя, которое должно поддерживаться постоянным при любом положении поршня во время

различных частей рабочего цикла и при котором работа, проводимая в нем за один такт, будет равняться эффективной работе за весь цикл:

$$p_e = \frac{W_e}{V_h}, \quad (25)$$

где W_e – эффективная работа цикла, Дж;

V_h – объем цилиндра см³;

Связь среднего эффективного давления p_e с крутящим моментом двигателя M_e определяется по формуле:

$$M_e = \frac{p_e \cdot i \cdot V_h}{0,314 \cdot \tau_d}, \quad (26)$$

где τ_d – тактность двигателя, (2 или 4);

i – количество цилиндров.

Связь среднего эффективного давления и крутящего момента с мощностью двигателя определяется по формуле:

$$N_e = \frac{p_e \cdot i \cdot V_h \cdot n_e}{0,3 \cdot \tau_d} = \frac{M_e \cdot n_e}{9550}, \quad (27)$$

где n_e – частота вращения коленчатого вала двигателя.

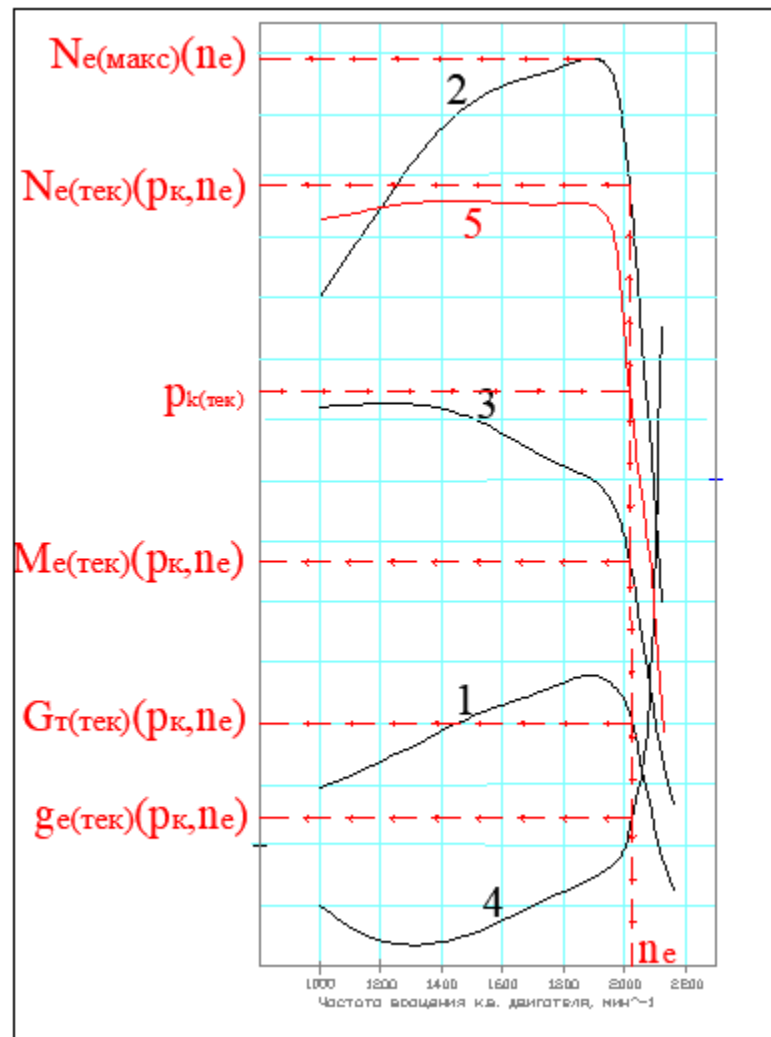
Поскольку, с математической точки зрения, для данного двигателя, среднее эффективное давление можно представить как эмпирическую функцию давления наддува p_k (с физической точки зрения, направление связи является противоположным), с учетом формул (24), (26) и (27) становится возможным записать:

$$p_e = f(p_k), \quad (28)$$

$$M_e = f(p_e) = f(p_k), \quad (29)$$

$$N_e = f(M_e, n_e) = f(p_e, n_e) = f(p_k, n_e), \quad (30)$$

В результате, зная характеристику двигателя и применяя подход, аналогичный описанному ранее методу определения энергетических показателей работы МТА по расходу топлива [29], становится возможным, измерив во время эксплуатации давление наддува p_k , определить текущие значения связанных показателей (рисунок 27)



1 – график расхода топлива двигателя; 2 – график эксплуатационной мощности двигателя; 3 – график крутящего момента; 4 – график удельного расхода топлива;

5 – график давления наддува

Рисунок 27 – Определение текущих показателей работы двигателя по известной характеристике

Из формул (25), (26) и (27) видно, что среднее эффективное давление характеризует только степень форсирования и его значения для различных двигателей одного типа, независимо от их мощности будут находиться в одном диапазоне. Значения среднего эффективного давления для поршневых двигателей различных типов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения среднего эффективного давления для различных типов поршневых двигателей

Тип двигателя	Среднее эффективное давление p_e , МПа
Четырехтактные карбюраторные двигатели	0,6 – 1,1
Форсированные четырехтактные карбюраторные и двигатели с электронным впрыском	до 1,3
Четырехтактные дизельные двигатели без наддува	0,65 – 0,85
Четырехтактные дизельные двигатели с наддувом	до 2,0
Двухтактные быстроходные дизельные двигатели	0,4 – 0,75
Газовые двигатели	0,5 – 0,75

Значения давления турбонаддува p_k также для промышленных дизельных двигателей не превышают 300 кПа (наиболее распространены двигатели, максимальное значение давления наддува которых находится в пределах 200...250 кПа).

Энергетический потенциал двигателя, доступный для использования в текущий момент времени при любом положении органа управления регулятором частоты вращения двигателя возможно определить с помощью коэффициента использования мощности двигателя K_N , определяемого по формуле:

$$K_N = \frac{N_{e(\text{тек})}}{N_{e(\text{макс})}(n_{e(\text{тек})}, \Delta_p)}, \quad (28)$$

где $N_{e(\text{тек})}$ – текущая потребляемая эффективная мощность, кВт;

$N_{e(\text{макс})}(n_{e(\text{тек})}, \Delta_p)$ – максимальная эффективная мощность, развиваемая двигателем по регуляторной ветви регуляторной характеристики при текущем положении органа управления регулятором частоты вращения коленчатого вала двигателя, кВт;

$n_{e(\text{тек})}$ – текущая частота вращения коленчатого вала двигателя, об/мин;

Δ_p – степень неравномерности регулятора частоты вращения, определяемая по формуле:

$$\Delta_p = \frac{2 \cdot (n_{x\text{max}} - n_p)}{n_{x\text{max}} + n_p}, \quad (29)$$

где $n_{x\text{max}}$ – максимальная частота вращения холостого хода, об/мин;

n_p – частота вращения, при которой двигатель развивает 90% максимальной мощности при работе по регуляторной ветви регуляторной характеристики, об/мин.

Поскольку эмпирические зависимости (28), (29) и (30) для данного двигателя являются неизменными, то в любой момент времени, при любом положении органа управления регулятором двигателя, зная текущие значения давления турбонаддува $p_{k(\text{тек})}$ и частоты вращения коленчатого вала двигателя $n_{e(\text{тек})}$, становится возможным определить коэффициент использования мощности двигателя:

$$K_N = \frac{p_{k(\text{тек})} - p_{k(\text{мин})}(n_{e(\text{тек})}, \Delta_p)}{p_{k(\text{макс})}(n_{e(\text{тек})}, \Delta_p) - p_{k(\text{мин})}(n_{e(\text{тек})}, \Delta_p)}, \quad (30)$$

где $p_{k(\text{макс})}(n_{e(\text{тек})}, \Delta_p)$ – давление турбонаддува при максимальной мощности, развиваемой двигателем по регуляторной ветви регуляторной характеристики при текущем положении органа управления регулятором частоты вращения коленчатого вала двигателя, кПа;

$p_{к(мин)}(n_{e(тек)}, \Delta_p)$ – давление турбонаддува при холостой работе двигателя ($N_e = 0$) по регуляторной ветви регуляторной характеристики при текущем положении органа управления регулятором частоты вращения коленчатого вала двигателя, кПа;

По сравнению с рассмотренным в первой главе методом определения энергетических показателей работы МТА по расходу топлива, данный метод имеет ряд преимуществ:

- метод позволяет определять мгновенные значения целевых параметров;
- для измерения давления наддува не требуется вносить изменения в конструкцию двигателя, которые могут повлиять на его выходные параметры и функциональность;
- для измерения давления наддува большинства двигателей можно использовать один тип манометра с одним диапазоном измерений.

Для оценки точности определения степени загрузки двигателя по разработанному методу и обоснования метрологических характеристик измерительного средства, необходимо рассчитать максимально допустимый предел погрешности измерений.

При определении в соответствии с формулой (30), коэффициент использования мощности двигателя K_N является косвенной величиной, определяемой тремя независимо измеряемыми величинами ($p_{к(тек)}$, $p_{к(макс)}$ и $p_{к(мин)}$), поэтому, значение результирующей абсолютной погрешности ΔK_N будет определяться суммой произведений частных производных первого порядка по каждому аргументу на абсолютные погрешности измеряемых величин. Поскольку каждая из этих измеряемых величин будет определяться одним и тем же средством измерения, примем ее одинаковой. В этом случае, результирующая погрешность определения коэффициента загрузки двигателя будет определяться по формуле:

$$\Delta K_N = \sqrt{\left(\frac{1}{p_{k(\text{макс})} - p_{k(\text{мин})}} \cdot \Delta p\right)^2 + \left(\frac{p_{k(\text{тек})}}{(p_{k(\text{макс})} - p_{k(\text{мин})})^2} \cdot \Delta p\right)^2 + \left(\left(\frac{p_{k(\text{тек})} - p_{k(\text{мин})}}{(p_{k(\text{макс})} - p_{k(\text{мин})})^2} - \frac{1}{p_{k(\text{макс})} - p_{k(\text{мин})}}\right) \cdot \Delta p\right)^2}, \quad (31)$$

где Δp – абсолютная погрешность средства измерения, кПа;

Зная требуемую точность определения коэффициента использования мощности двигателя и возможные диапазоны измерений, становится возможным, решив уравнение (31) относительно Δp , определить необходимую допустимую погрешность средства измерения. Для упрощения решения этой задачи, была построена контурная диаграмма (рисунок 28), благодаря которой возможно определить, как соответствие метрологических характеристик манометра требованиям, предъявляемым к точности определения K_N , так и результирующую точность определения K_N при использовании средств измерений с известными характеристиками.

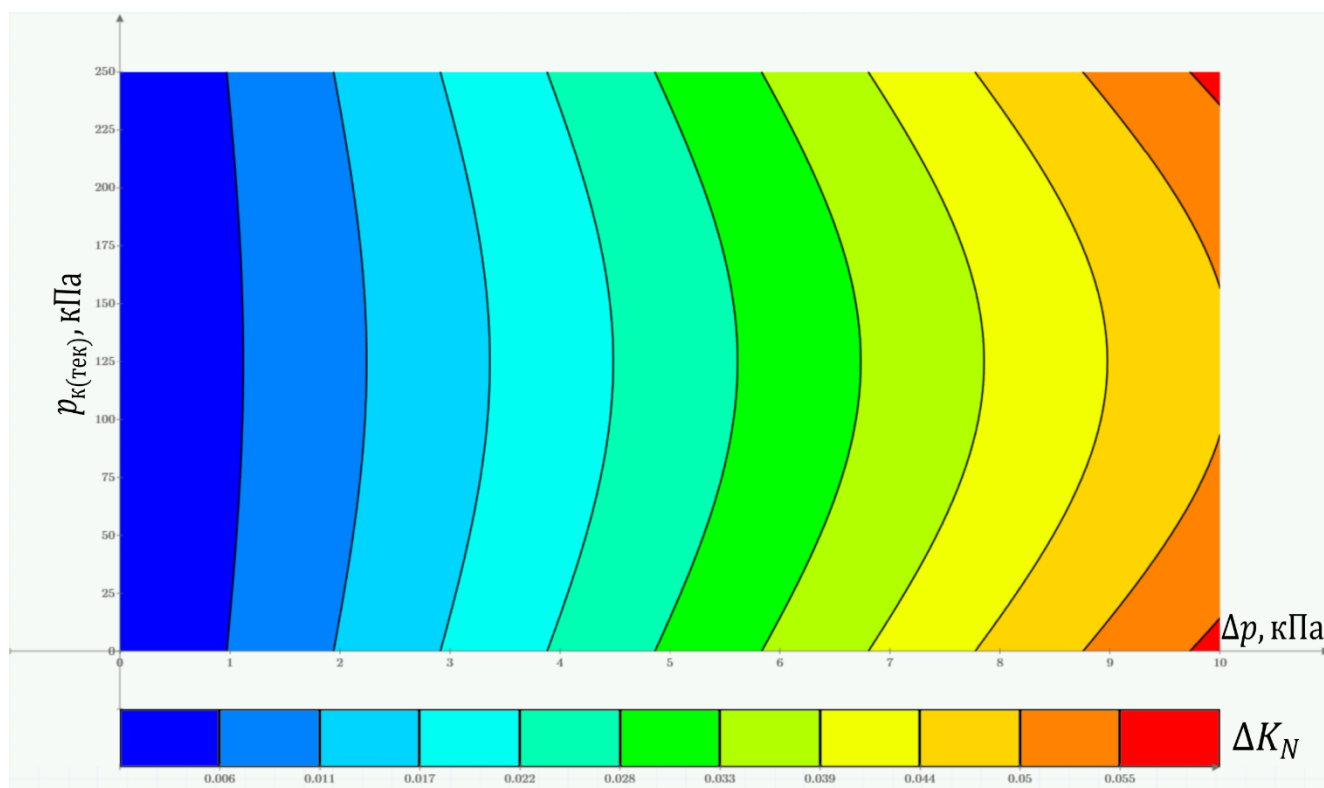


Рисунок 28 – Диаграмма взаимосвязи значений $p_{k(\text{тек})}$, Δp и ΔK_N

2.2 Обоснование и математическое моделирование метода инструментального контроля скорости движения и буксования колес трактора

Основным показателем, характеризующим соответствие тягово-сцепных свойств ходовой системы трактора выполняемой сельскохозяйственной работе, является буксование его ведущих движителей. При проведении испытаний и исследований показателей эффективности работы МТА, для определения буксования, на ведущие колеса трактора устанавливают датчики угла поворота (рисунок 14) [103, 109]. 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

$$\delta_i = \left(1 - \frac{n'_{Ki}}{n_{Ki}}\right) \cdot 10^2, \quad (32)$$

а при использовании путеизмерителя

$$\delta_i = \left(1 - K_i \frac{I_s}{I_i}\right) \cdot 10^2, \quad (33)$$

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

$$\delta = \frac{1}{n_{в.д.}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{в.д.}} \delta_i = \frac{1}{n_{в.д.}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{в.д.}} \left(1 - K_i \frac{I_s}{I_i}\right) \cdot 10^2, \quad (34)$$

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 обычной эксплуатации сельскохозяйственного трактора [44, 76]. В то же время, существует теоретическая возможность определения буксования более простым способом.

В общем случае, буксование как кинематический фактор, определяется отношением величины снижения скорости к возможному ее теоретическому значению при движении без буксования по формуле (2). 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:

$$\delta = \left(1 - \frac{v_{\text{факт}}}{k' \cdot n_e}\right) \cdot 10^2, \quad (35)$$

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)

$$k' = \frac{v'_{\text{факт}}}{n'_e}, \quad (36)$$

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 2.

По экспериментальным данным, представленным в таблице 2, были рассчитаны значения буксования $\delta_{(ф.3)}$ и $\delta_{(ф.5)}$ по формулам (33) и (35) соответственно, при этом коэффициент k' , необходимый для расчета по формуле (35) определялся по результатам измерений при $R_T = 0,08$ кН (экспериментальная точка №1 в таблице 2) и составил $9,61 \cdot 10^{-4}$.

Таблица 2 – 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 движения $v_{\text{факт}}$, 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 (34) и (35), 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_{Ti} 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 (37), (38), разработанные для промышленных тракторов Ю.В. Гинзбургом [52, 75], 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.

$$\delta = 1 - \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{max}}\right)^a, \quad (37)$$

$$\delta = 1 - \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{max}}\right)^{0,1\left(1 + \frac{\varphi}{\varphi_{max}}\right)}, \quad (38)$$

где φ и φ_{max} – удельная сила тяги и её максимальное значение на ведущих двигателях 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 [89], который предлагал использовать разные виды эмпирических функций в зависимости от диапазона тягового усилия

$$\left. \begin{aligned} \delta &= a\varphi \text{ при } \varphi \leq 0,5 \text{ и} \\ \delta &= b\varphi^c + t \text{ при } \varphi \geq 0,5 \end{aligned} \right\}, \quad (39)$$

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

Сама по себе, формула (39), 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) [127, 128, 129, 153, 154, 155, 156, 157, 165], 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, в большей степени являясь алгоритмом, 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 [125, 166]. Для нашего случая, регрессионную модель можно записать в виде:

$$\delta = f(R_T) := \text{interp}[\text{LOESS}(X, Y, \text{span}), X, Y, R_T], \quad (40)$$

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

$$1 < \text{span} \cdot n < 2n, \quad (41)$$

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 29, значения функции, соответствующие опытным R_{Ti} , а также отклонения экспериментальных и рассчитанных по формулам (33), (34) и (35) значений буксования – в таблице 3.

Из таблицы 3 и рисунка 29 следует, что расчет буксования по измеренным значениям фактической скорости и частоты вращения коленчатого вала двигателя в соответствии с формулой (35), 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.

Таблица 3 – Регрессионная модель буксования колес трактора Беларус 3522

№ эксп. точки	$\delta = f(R_T), \%$	$\delta_{(\Phi.3)} = \frac{1}{n_{\text{в.д.}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{в.д.}}} \delta_i, \%$	$\delta_{(\Phi.5)} = \left(1 - \frac{v_{\text{факт}}}{k' \cdot n_i}\right) \cdot 10^2, \%$	$\Delta_i = \sqrt{(\delta_{(\Phi.3)} - f(R_{T_i}))^2}, \%$	$\Delta_i = \sqrt{(\delta_{(\Phi.5)} - f(R_{T_i}))^2}, \%$	$\Delta_i = \sqrt{(\delta_{1i} - f(R_{T_i}))^2}, \%$	$\Delta_i = \sqrt{(\delta_{2i} - f(R_{T_i}))^2}, \%$	$\Delta_i = \sqrt{(\delta_{3i} - f(R_{T_i}))^2}, \%$	$\Delta_i = \sqrt{(\delta_{4i} - f(R_{T_i}))^2}, \%$
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

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 13) для определения фактической скорости $v_{\text{факт}}$ и $v'_{\text{факт}}$, продолжает накладывать значительные ограничения на распространение метода.

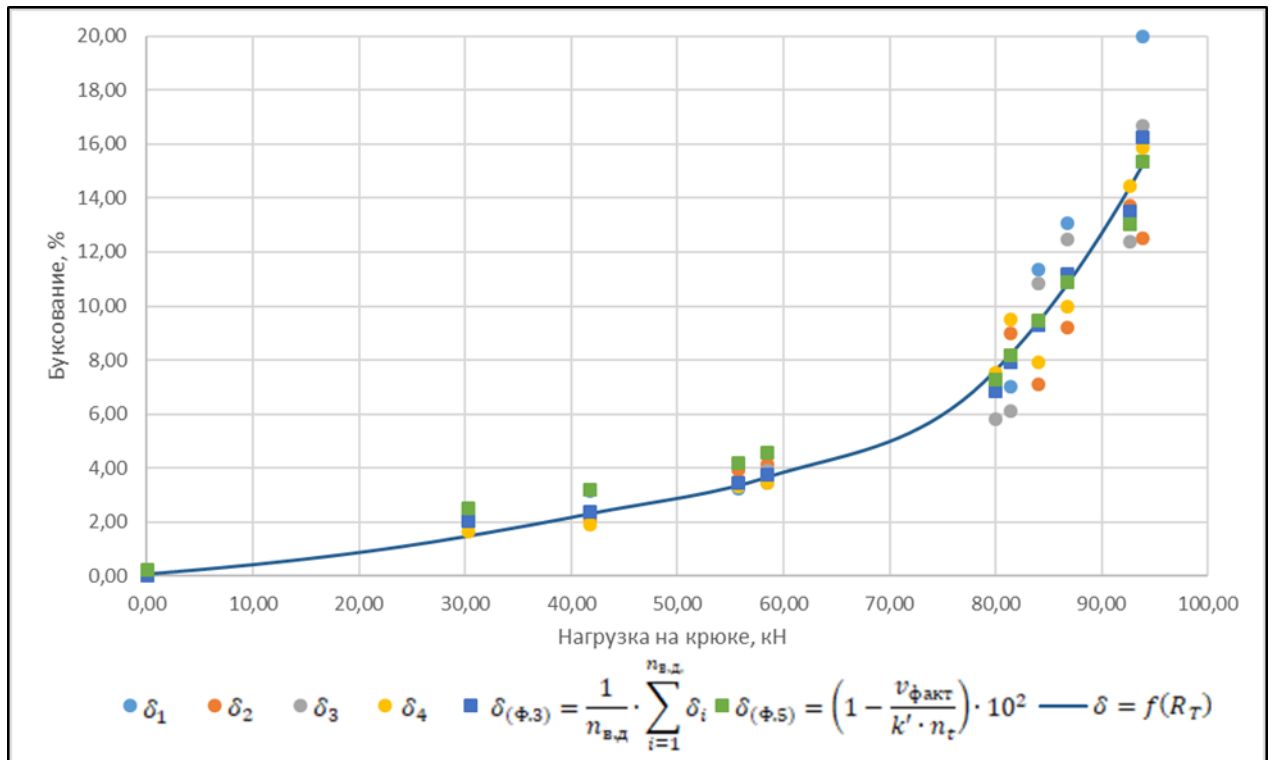


Рисунок 29 – Регрессионная модель буксования колес трактора Беларусь 3522

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 ГОСТ 30745 [25] и международным стандартом ISO 789-9 [138] по формуле (32), 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:

$$\Delta\delta_{ISO} = \sqrt{\left(\frac{10^2}{\bar{n}_K} \cdot \Delta n'_K\right)^2 + \left(\frac{\bar{n}'_K \cdot 10^2}{\bar{n}_K^2} \cdot \Delta n_K\right)^2}, \quad (42)$$

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 (35) примет вид

$$\delta_{PP} = \left(1 - \frac{S_{PP}}{n_{e(S)} \cdot k'_S}\right) \cdot 10^2, \quad (43)$$

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).

При фиксированном передаточном отношении, коэффициент k'_S также будет зависеть от наружного диаметра D , (м), ширины профиля B , (м) и нормального прогиба f , (м) шины:

$$f = \frac{C_2 \cdot G_K}{2 \cdot (p_W + p_0)} + \sqrt{\left[\frac{C_2 \cdot G_K}{2 \cdot (p_W + p_0)}\right]^2 + C_1 \cdot G_K}, \quad (44)$$

где G_K – нагрузка на колесо, кН;

p_W – внутреннее давление в шине, кПа.;

C_1, C_2, p_0 – постоянные коэффициенты для данной шины, кПа.

Стандарт [30] рекомендует рассчитывать коэффициенты универсальной характеристики шины C_1, C_2, p_0 по формулам:

$$C_1 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N x_i \cdot \sum_{i=1}^N x_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2}, \quad (45)$$

$$C_2 = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^N x_i \cdot \sum_{i=1}^N y_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2}, \quad (46)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$ – степень нагрузки на шину по ГОСТ 7463 [121];

$$x_i = \frac{[f]}{(p_w + p_0)}, \quad (47)$$

$$y_i = \frac{[f]^2}{G_k}, \quad (48)$$

$$p_0 = 16,7 \cdot n \cdot \left(\sqrt{\frac{D}{B}} - 1,4 \right) - 28 \geq 0, \quad (49)$$

где n – норма слойности;

$[f]$ – допустимый статический прогиб шины, м., определяемый по формуле:

$$[f] = \frac{D}{2} - r_0, \quad (50)$$

где r_0 – статический радиус по ГОСТ 7463 [25];

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

$$\Delta\delta_{PP} = \sqrt{\left(\frac{10^2}{k'_S \cdot \bar{n}_{e(S)}} \cdot \Delta S_{PP}\right)^2 + \left(\frac{\bar{S}_{PP} \cdot 10^2}{k'_S \cdot \bar{n}_{e(S)}^2} \cdot \Delta n_{e(S)}\right)^2}, \quad (51)$$

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 (35) примет вид

$$\delta_{DM} = \left(1 - \frac{v_{\text{факт}} \cdot t}{n_{e(t)} \cdot k'}\right) \cdot 10^2, \quad (52)$$

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:

$$\Delta\delta_{DM} = \sqrt{\left(\frac{\bar{t} \cdot 10^2}{k' \cdot \bar{n}_{e(t)}} \cdot \Delta v_{\text{факт}}\right)^2 + \left(\frac{\bar{t} \cdot \bar{v}_{\text{факт}} \cdot 10^2}{k' \cdot \bar{n}_{e(t)}^2} \cdot \Delta n_{e(t)}\right)^2 + \left(\frac{\bar{v}_{\text{факт}} \cdot 10^2}{k' \cdot \bar{n}_{e(t)}} \cdot \Delta t\right)^2}, \quad (53)$$

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 (42), (51) и (53) удобно представить в виде функции одного аргумента – пути S , пройденного трактором при измерении. Формула (42) примет вид:

$$\Delta\delta_{ISO}(S) = \sqrt{\left(\frac{10^2}{\bar{n}_K(S)} \cdot \Delta n'_K\right)^2 + \left(\frac{\bar{n}'_K(S) \cdot 10^2}{\bar{n}_K^2(S)} \cdot \Delta n_K\right)^2}, \quad (54)$$

где:

$$\bar{n}_K(S) = \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot R_K}, \quad (55)$$

$$\bar{n}'_K(S) = \frac{2 \cdot \bar{\delta} \cdot S}{2 \cdot \pi \cdot R_K}, \quad (56)$$

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

R_K – радиус качения колеса трактора, м.

Формула (51) примет вид

$$\Delta\delta_{PP}(S) = \sqrt{\left(\frac{10^2}{k'_S \cdot \bar{n}_{e(S)}(S)} \cdot \Delta S_{PP}\right)^2 + \left(\frac{S \cdot 10^2}{k'_S \cdot \bar{n}_{e(S)}(S)^2} \cdot \Delta n_{e(S)}\right)^2}, \quad (57)$$

где:

$$\bar{n}_{e(S)}(S) = \frac{S \cdot 10^2}{k'_S \cdot (\bar{\delta} - 10^2)}, \quad (58)$$

И формула (53) примет вид

$$\Delta\delta_{DM}(S) = \sqrt{\left(\frac{\bar{t}(S) \cdot 10^2}{k' \cdot \bar{n}_{e(t)}(S)} \cdot \Delta v_{fact}\right)^2 + \left(\frac{\bar{t}(S) \cdot \bar{v}_{fact} \cdot 10^2}{k' \cdot \bar{n}_{e(t)}(S)^2} \cdot \Delta n_{e(t)}\right)^2 + \left(\frac{\bar{v}_{fact} \cdot 10^2}{k' \cdot \bar{n}_{e(t)}(S)} \cdot \Delta t\right)^2}, \quad (59)$$

где:

$$\bar{t}(S) = \frac{S}{\bar{v}_{факт}}, \quad (60)$$

$$\bar{n}'_{e(t)}(S) = \frac{S}{k'}, \quad (61)$$

Графики функции $\Delta\delta_{ISO}(S)$, $\Delta\delta_{PP}(S)$ и $\Delta\delta_{DM}(S)$ при значениях $\Delta S = \pm 5$ м, $\Delta v_{\text{факт}} = \pm 0,02 \cdot v_{\text{факт}}$, $\Delta t = \pm 0,1$ 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 30.

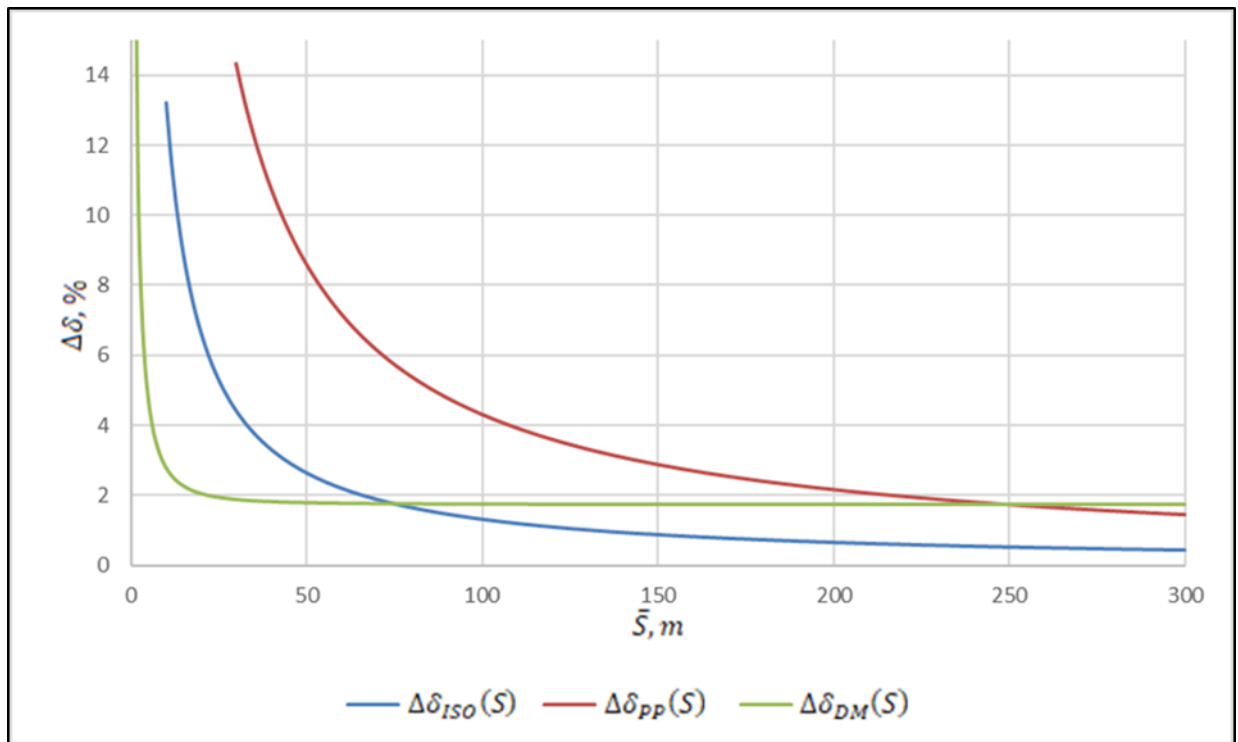


Рисунок 30 – Графики функции $\Delta\delta_{ISO}(S)$, $\Delta\delta_{PP}(S)$ и $\Delta\delta_{DM}(S)$

Из анализа полученных зависимостей (51) и (53) видно, что 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 30 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.

2.3 Обоснование и математическое моделирование метода расчета оптимального соотношения скоростного режима работы двигателя и ступени трансмиссии

Расчет альтернативных комбинаций скоростного режима работы двигателя и передаточных отношений (ступеней) трансмиссии, в зависимости от стратегических целей, определенных оператором МТА, может преследовать одну из следующих целей:

1. Достижение максимальной возможной производительности.

2. Достижение максимальной возможной топливно-энергетической эффективности при сохранении текущей скорости движения.

Решение этой задачи заключается в нахождении такой точки «1» на комбинированной характеристике двигателя (рисунок 31), при которой обеспечивается необходимый запас мощности, но повышается энергоэффективность. Поскольку при этом изменяется частота вращения коленчатого вала двигателя, для того, чтобы обеспечить необходимую скорость движения, необходимо соответствующим образом изменить передаточное отношение трансмиссии (перейти на другую ступень). Диапазоны возможной теоретической скорости движения (без учета буксования) на различных передачах определяются конструкцией трактора и приводятся в руководстве по эксплуатации в виде диаграмм или таблиц (рисунки 32, 33). Используя данные этих таблиц, значение k' (формула 36), значение f (формула 44) и буксование δ , решая уравнение (35) относительно $v_{\text{факт}}$, становится возможным определить ожидаемую скорость движения агрегата при любой скорости вращения коленчатого вала двигателя для любой ступени трансмиссии. Определить необходимую скорость вращения коленчатого вала двигателя, для достижения заданной скорости движения агрегата возможно, решив уравнение (35) относительно n_e .

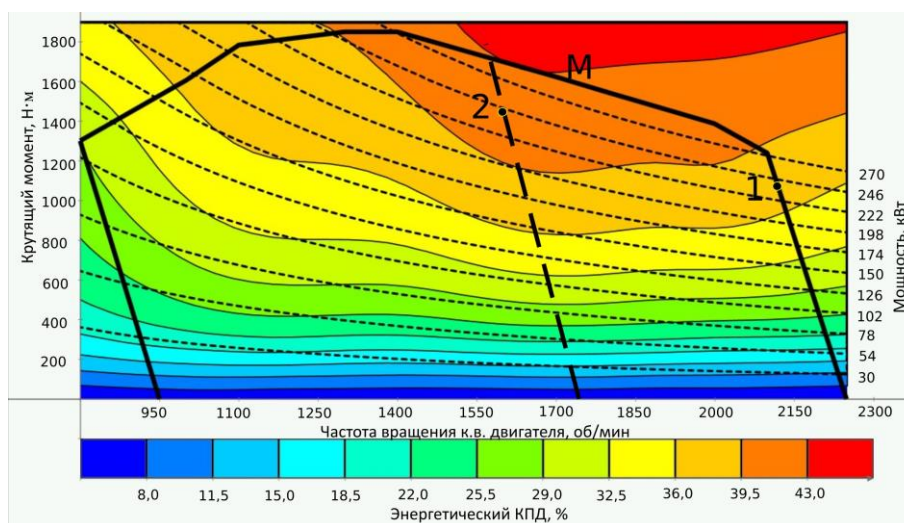


Рисунок 31 – Комбинированная характеристика двигателя Cummins QSM-11

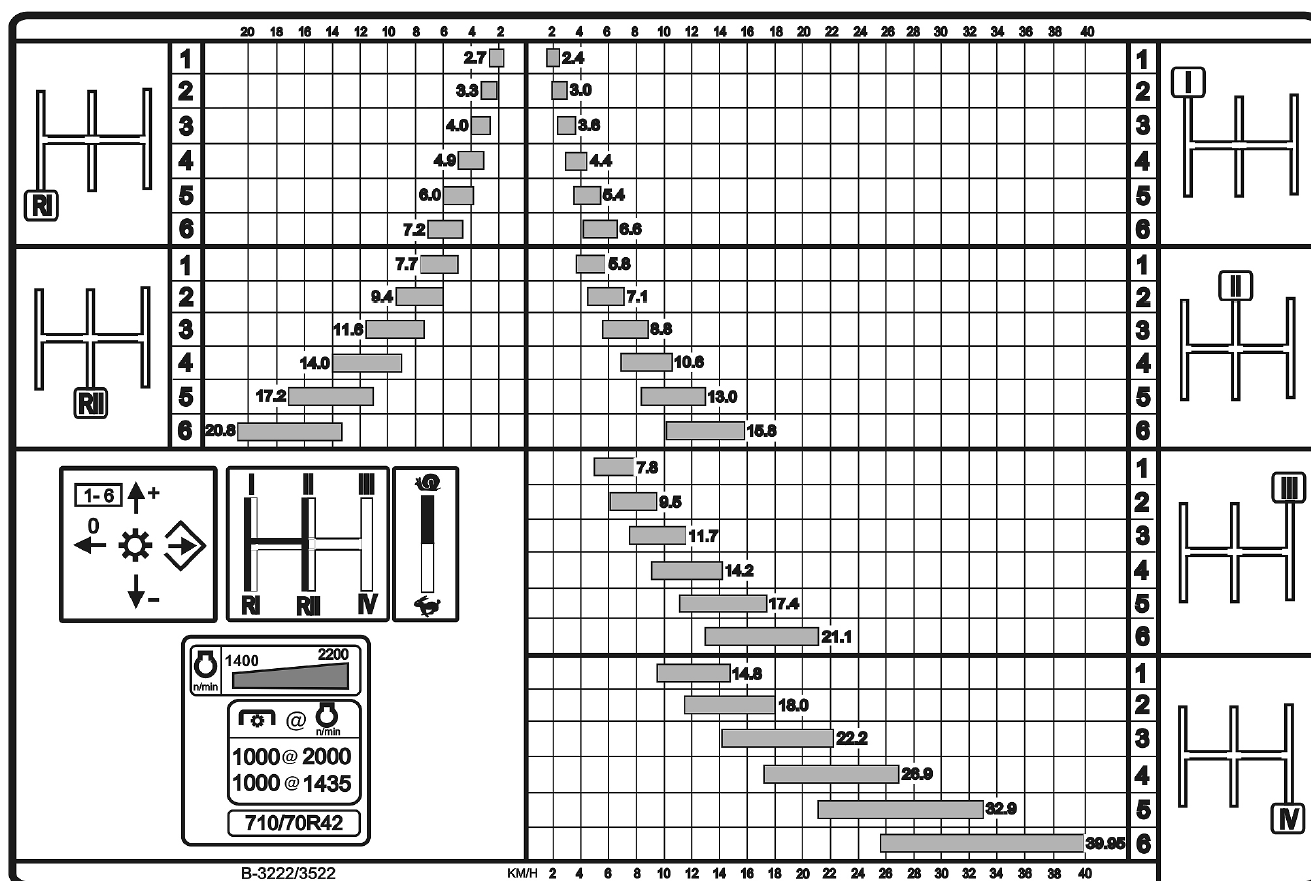


Рисунок 32 – Диаграмма скоростей тракторов «БЕЛАРУС – 3222/3522»

SPEED CHART																			
SPEEDS AT 2100 ENGINE RPM - Km/h (MPH)																			
TRANSMISSION	TRACTOR MODELS	TIRE GROUP	LOW RANGE				MEDIUM RANGE				HIGH RANGE				REVERSE				
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
12 X 4 QUAD SHIFT III	2290	A	4.2 (2.6)	5.0 (3.1)	5.8 (3.6)	6.7 (4.2)	7.7 (4.8)	9.0 (5.6)	10.4 (6.5)	12.2 (7.6)	15.8 (9.9)	18.4 (11.5)	21.4 (13.4)	25.1 (15.7)	5.4 (3.4)	6.4 (4.0)	7.4 (4.6)	8.6 (5.4)	
	2335		4.3 (2.7)	5.1 (3.2)	5.9 (3.7)	7.0 (4.4)	8.0 (5.0)	9.3 (5.8)	10.9 (6.8)	12.6 (7.9)	16.5 (10.3)	19.4 (12.1)	22.6 (14.1)	26.2 (16.4)	5.8 (3.6)	6.7 (4.2)	7.8 (4.9)	9.1 (5.7)	
	2360	C	4.6 (2.9)	5.3 (3.3)	6.2 (3.9)	7.2 (4.5)	8.3 (5.2)	9.8 (6.1)	11.4 (7.1)	13.3 (8.3)	17.3 (10.8)	20.2 (12.6)	23.5 (14.7)	27.4 (17.1)	5.9 (3.7)	6.9 (4.3)	8.2 (5.1)	9.6 (6.0)	
	2375																		
	2425																		
12 X 2 POWERSHIFT			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2			
	2290	A	3.7 (2.3)	4.5 (2.8)	5.3 (3.3)	6.4 (4.0)	7.7 (4.8)	9.1 (5.7)	10.7 (6.7)	12.8 (8.0)	15.2 (9.5)	18.2 (11.4)	21.9 (13.7)	25.9 (16.2)	4.6 (2.9)	8.0 (5.0)			
	2335		4.0 (2.5)	4.6 (2.9)	5.6 (3.5)	6.7 (4.2)	8.0 (5.0)	9.6 (6.0)	11.2 (7.0)	13.4 (8.4)	15.8 (9.9)	19.0 (11.9)	23.0 (14.4)	27.2 (17.0)	4.9 (3.1)	8.5 (5.3)			
	2360	B	4.1 (2.6)	5.0 (3.1)	5.8 (3.6)	7.0 (4.4)	8.3 (5.2)	9.9 (6.2)	11.7 (7.3)	14.1 (8.8)	16.6 (10.4)	19.8 (12.4)	24.0 (15.0)	28.3 (17.7)	5.1 (3.2)	8.8 (5.5)			
	2375																		
	2425																		

TIRE GROUP A		Rolling Radius	TIRE GROUP B		Rolling Radius	TIRE GROUP C		Rolling Radius
24.5 R32 R1 Radial		785 mm (30.9")	20.8 x 38 R1 Bias		836 mm (32.9")	20.8 R42 Radial		874 mm (34.4")
30.5 R32 R1 Radial		787 mm (31.0")	30.5 x 32 R2 Bias		836 mm (32.9")	20.8 R42 R1W Radial		876 mm (34.5")
18.4 R38 Radial		790 mm (31.1")	18.4 R42 Radial		843 mm (33.2")	20.8 x 42 R1 Bias		889 mm (35.0")
18.4 x 38 R1 Bias		813 mm (32.0")	700/65 x 38 Special		848 mm (33.4")	750/65 x 38 Special		894 mm (35.2")
24.5 x 32 R1 Bias		820 mm (32.3")	20.8 x 38 R2 Bias		848 mm (33.4")	850/60 x 38 Special		894 mm (35.2")
18.4 x 38 R2 Bias		820 mm (32.3")	710/70 R38 Radial		851 mm (33.5")	18.4 R46 Radial		894 mm (35.2")
20.8 R38 Radial		823 mm (32.4")	710/70 R38 R1W Radial		856 mm (33.7")	20.8 R42 R2 Radial		914 mm (36.0")
20.8 R38 R1W Radial		826 mm (32.5")	18.4 R42 Radial		866 mm (34.1")			
30.5 x 32 R1 Bias		820 mm (32.3")						

Рисунок 33 – Таблица скоростей тракторов «Versatile 2290-2425»

Задача определения точки Б на комбинированной характеристике двигателя легко решается графическим методом (рисунки 17 и 27). Для возможности аналитического решения, взаимосвязь параметров характеристики двигателя следует представить в виде функциональных зависимостей. Поскольку указанная взаимосвязь параметров двигателя является эмпирической и не описывается простыми математическими функциями, для ее представления в аналитическом виде, также удобно воспользоваться методом LOESS.

2.4 Обоснование и математическое моделирование метода расчета баллаستировки 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 (37), (38), (39) и аналогичных, требует знания фактических значений тягового усилия, развиваемого трактором.

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

$$\delta = f(R_T, G_T, k_{td}, k_s), \quad (62)$$

где R_T – тяговое сопротивление, оказываемое орудием, кН;

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

k_s – эмпирический коэффициент, характеризующий сцепные качества почвы,

то становится видно, что наличие в формуле (62) 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 ΔG_T , %, для конкретного вида работы, можно представить формулу (62) в виде

$$\Delta G_T = f(\Delta\delta, G_T, k_{td}), \quad (63)$$

где $\Delta\delta$ – целевое изменение буксования, необходимое для достижения оптимальных значений, %;

Таким образом исключается необходимость учета тягового сопротивления, оказываемого орудием R_T 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) [169] в испытательной лаборатории Nebraska Tractor Test Laboratory (NTTL). Были проанализированы 1264 отчета об испытаниях, проведенных за период с 2000 г. по настоящее время [159]. 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 34 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.

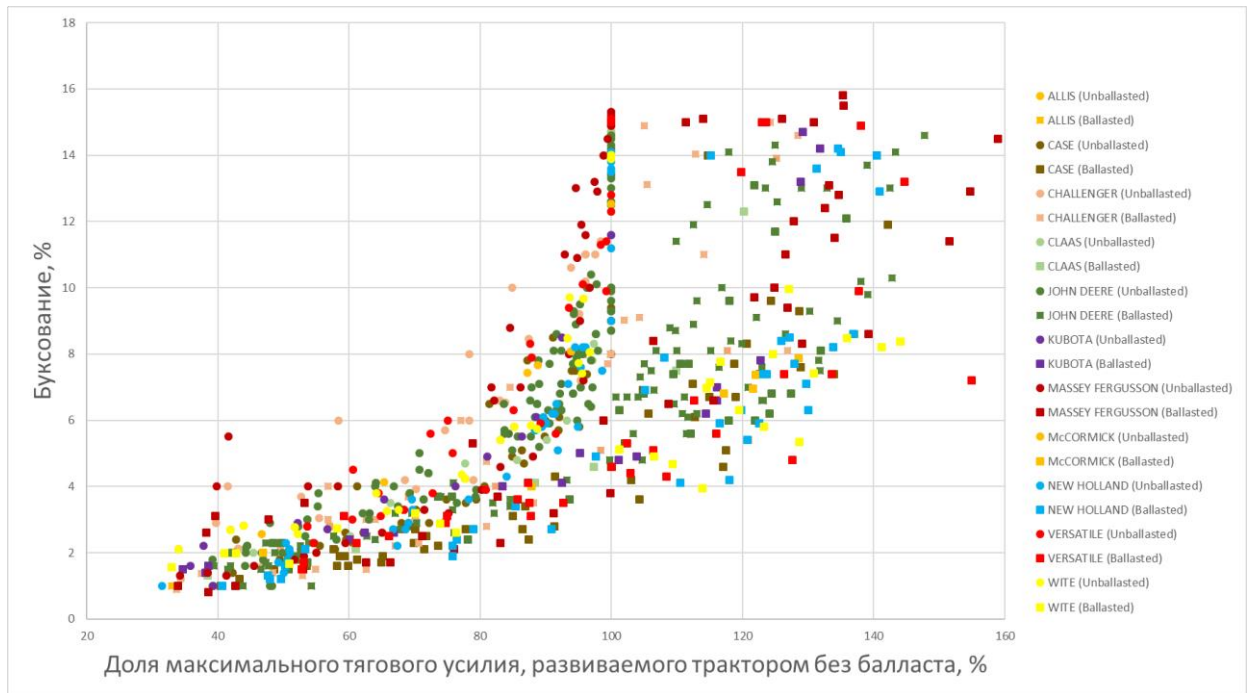


Рисунок 34 – Экспериментальные значения буксования в зависимости от тягового усилия, выраженного в процентах от максимального тягового усилия без балласта на бетонном треке

На следующем этапе, для каждой модели трактора, методом непараметрической регрессии LOESS, были построены математические модели буксования в виде функции тягового усилия и рассчитаны распределения изменения буксования $\Delta\delta$ при относительном изменении веса трактора ΔG_T для различных уровней тягового усилия. Плотности распределения ΔG_T и $\Delta\delta$ для уровней тягового усилия, соответствующих максимальной тяговой мощности и максимальному тяговому усилию, ограниченному буксованием без балласта, представлены на рисунке 35.

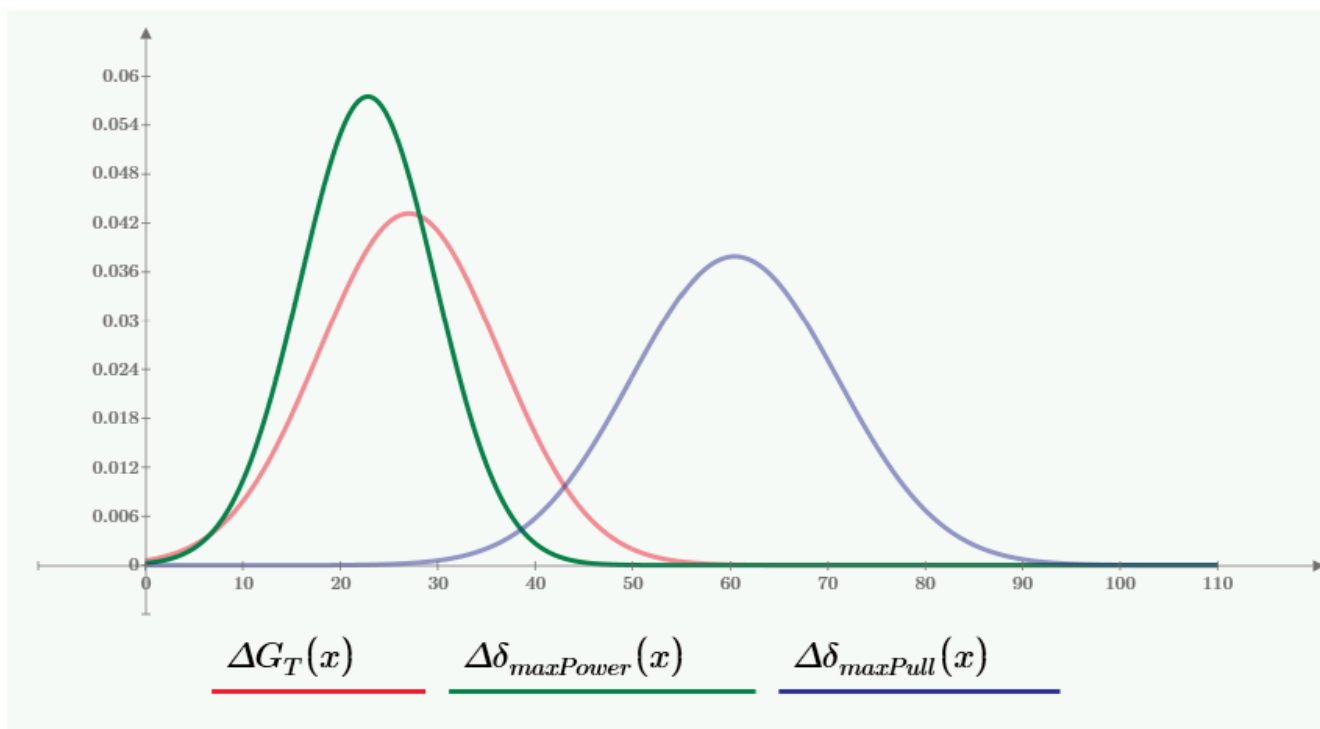


Рисунок 35 – Плотность распределения ΔG_T и $\Delta \delta$ при уровнях тягового усилия, соответствующих максимальной тяговой мощности ($maxPower$) и максимальному тяговому усилию ($maxPull$)

По результатам полученных распределений стало возможным построить регрессионные модели буксования «усредненного» колесного трактора при коэффициенте изменения сцепного веса $\Delta G_T = 28,38 \%$ 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 [133, 134, 151, 164].

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 $G_T \cdot 3,92 \cdot 10^{-3}$;
- 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 36.

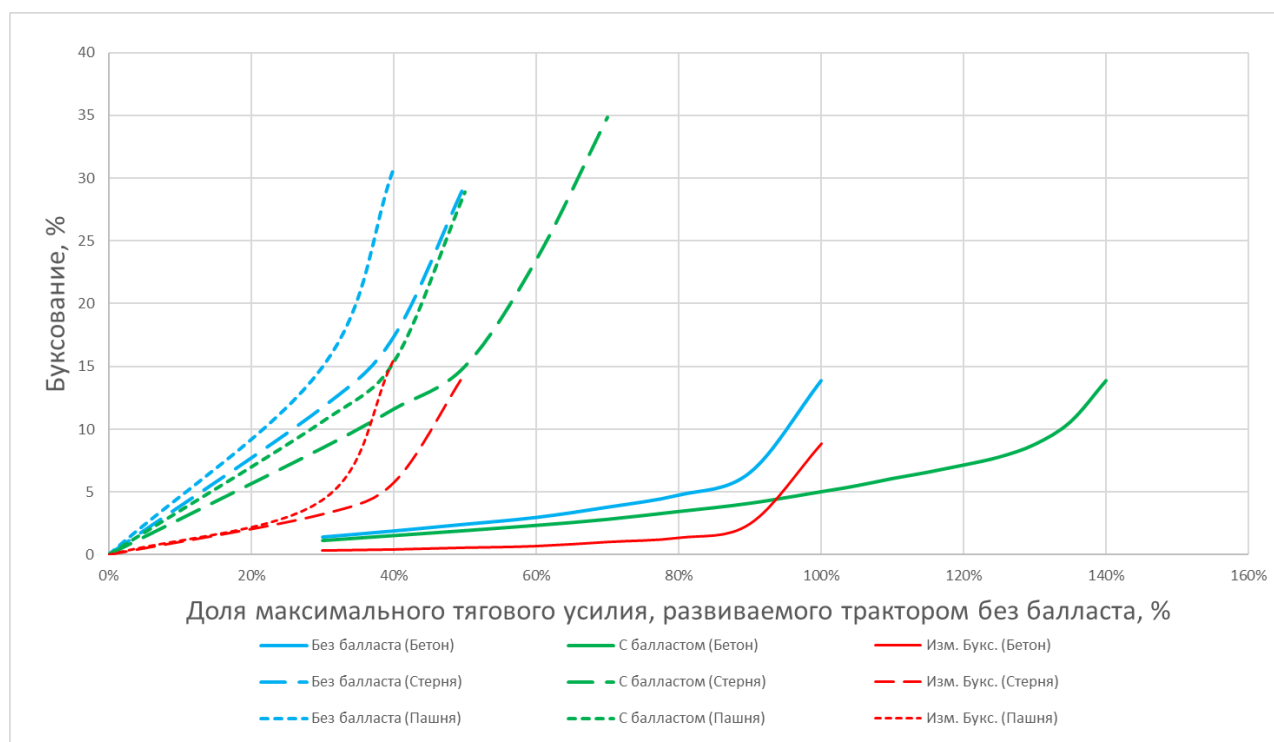


Рисунок 36 – Буксование как функция тягового усилия, выраженного в процентах от максимального тягового усилия без балласта на бетонном треке

Полученные модели демонстрируют, что при фиксированных изменениях веса трактора ($\Delta G_T = const$), изменение буксования происходит нелинейно и

зависит от тягового усилия. Поскольку при постановке задачи, в формуле (62), мы избавились от параметра R_T , удобно представить $\Delta\delta$ в виде функции исходного (измеренного) буксования, которая при каждом фиксированном значении ΔG_T , будет достаточно точно описываться уравнением:

$$\Delta\delta(\delta) = a \cdot (1 + \delta)^b, \quad (64)$$

где a и b – коэффициенты.

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

$$\Delta G_T(\delta, \Delta\delta) = \frac{c \cdot \Delta\delta}{a \cdot (1 + \delta)^b} \cdot 100, \quad (65)$$

где $a = 0,03$, $b = 1,77$ и $c = 0,28$ – коэффициенты.

График зависимости, приведенной в формуле (65), изображен на рисунке 37.

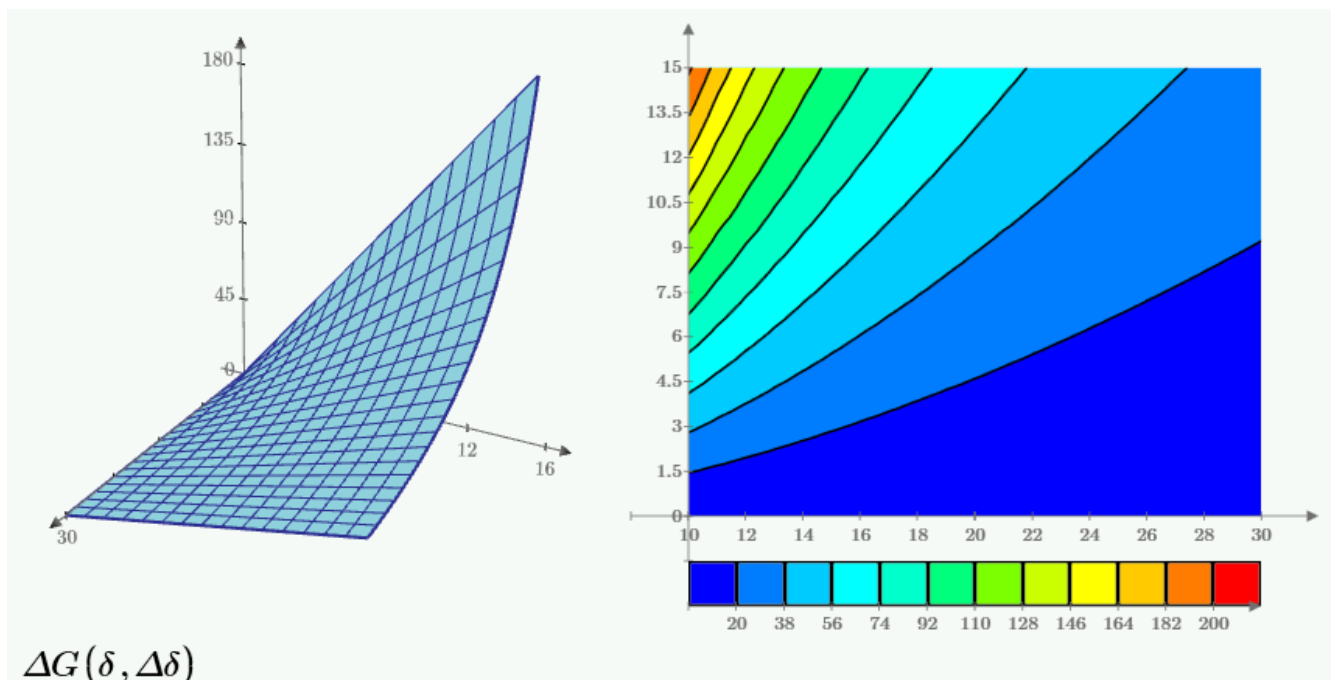


Рисунок 37 – Изменение сцепного веса трактора в виде функции текущего буксования и необходимого изменения буксования

Представленная модель позволяет, на основании измеренного буксования колес трактора, рассчитать вес излишнего (либо необходимого) балласта для первой итерации. В случае, если желаемый результат будет достигнут не в полной мере (расчетная вероятность успеха составляет 0,7), на основе новых данных могут быть рассчитаны и введены в модель уточненные эмпирические коэффициенты a , b и c .

2.5 Выводы по главе

1. Косвенный метод определения энергетических параметров работы двигателя по измерению давления турбонаддува, при высокой точности, обладает более высокой информативностью и рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами для инструментального контроля в условиях обычной эксплуатации сельскохозяйственных тракторов и машин. В отличие от традиционных методов и средств, измерение наддува не требует серьезного вмешательства в конструкцию двигателя, сложного и дорогостоящего оборудования и высокой квалификации обслуживающего персонала.

2. Разработанный метод определения буксования, в основе которого лежит измерение фактической скорости движения МТА с помощью приемника ГНСС, позволяет исключить необходимость использования датчиков вращения ведущих колес трактора и путеизмерителей для инструментального контроля буксования при выполнении сельскохозяйственных операций. На коротких интервалах, наиболее точным является метод измерения, основанный на прямых Допплеровских измерениях фактической скорости приемником ГНСС.

3. Для аналитического представления эмпирических энергетических характеристик двигателя и тяговых характеристик трактора, наиболее подходит метод локальных полиномиальных регрессий LOESS, который заключается в

объединении нескольких регрессионных моделей в метамоделю на основе определенного размера окна взвешивания вокруг каждой точки данных.

4. Для определения основных целевых показателей работы трактора со ступенчатой трансмиссией (текущая энергоемкость процесса, текущая производительность агрегата и буксование колес), достаточным является измерение четырех параметров: давление турбонаддува, давление в шинах, частота вращения коленчатого вала двигателя и фактическая скорость движения.

ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа и методика экспериментальных исследований метода инструментального контроля степени использования мощности двигателя

Для проверки работоспособности разработанного метода определения загрузки двигателя по давлению наддува в программу полевых исследований включены следующие этапы:

- экспериментальная оценка зависимости давления наддува во впускной магистрали двигателя от нагрузки на трактор во время выполнения технологической операции;

- сравнительная оценка результатов определения энергетических показателей работы МТА по разработанному и известным методам;

Место проведения исследований – валидационный полигон Новокубанского филиала ФГБНУ «Росинформагротех» (КубНИИТиМ). Условия проведения – реально сложившиеся на момент проведения исследований. Методика определения энергетических показателей – в соответствии с ГОСТ Р 52777-2007 [29]

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

- устройство измерения давления наддува во впускной магистрали двигателя;

- устройство измерения тягового сопротивления, оказываемого сельскохозяйственным орудием во время выполнения технологической операции;

- измерительно-регистрирующую аппаратуру, обеспечивающую прием, сигналов с первичных преобразователей давления наддува и тягового усилия;

- специализированное программное обеспечение для обработки и сохранения информации, поступающей от первичных преобразователей и измерительно-регистрирующей аппаратуры;

- оборудовать трактор преобразователем давления наддува, устройством измерения тягового сопротивления и измерительно-регистрирующей аппаратурой и провести измерения во время выполнения технологической операции.

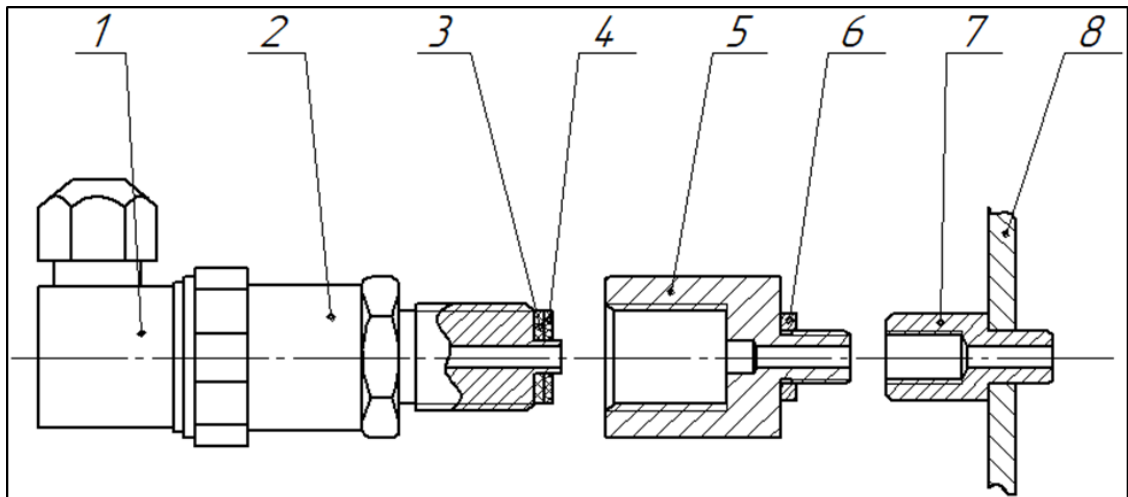
3.1.1 Разработка устройства определения давления наддува во впускной магистрали двигателя

Для измерения давления наддува во впускной магистрали двигателя был приобретен микропроцессорный датчик давления, предназначенный для непрерывного преобразования абсолютного давления измеряемой среды в унифицированный сигнал постоянного тока 4...20 мА ПД100И-ДА1,0-111-0,25 производства компании ОВЕН. Краткая техническая характеристика датчика представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Краткая характеристика датчика давления ОВЕН ПД100И-ДА1,0-111-0,25

Наименование показателя	Значение показателя
Измеряемое давление	Абсолютное
Верхний предел измерений	1,0 МПа
Выходной сигнал постоянного тока	4...20 мА, 2-проводная схема
Основная приведенная погрешность	0,25 % ВПИ
Диапазон рабочих температур измеряемой среды	минус 40...+100 °С
Напряжение питания	12...24 В постоянного тока
Сопротивление нагрузки	0...1,0 кОм (в зависимости от напряжения питания)
Потребляемая мощность	не более 0,8 Вт
Устойчивость к механическим воздействиям	группа исполнения V3 по ГОСТ Р 52931
Степень защиты корпуса	IP65
Устойчивость к климатическим воздействиям	УХЛ3.1
Диапазон рабочих температур окружающего воздуха	минус 40...+80 °С
Атмосферное давление рабочее	66...106,7 кПа

Для подключения датчика ко впускной магистрали двигателя изготовлен специализированный адаптер (рисунки 38 и 39)



1 – соединитель угловой; 2 – силовой измерительный тензорезисторный датчик Мерадат К-20Г-10-СЗ; 3 – прокладка уплотнительная резиновая; 4 – прокладка изолирующая бакелитовая; 5 – переходник; 6 – кольцо уплотнительное медное; 7 – вставка; 8 – стенка впускной магистрали двигателя

Рисунок 38 – Адаптер для подключения датчика ПД100И-ДА1,0-111-0,25 к впускной магистрали двигателя

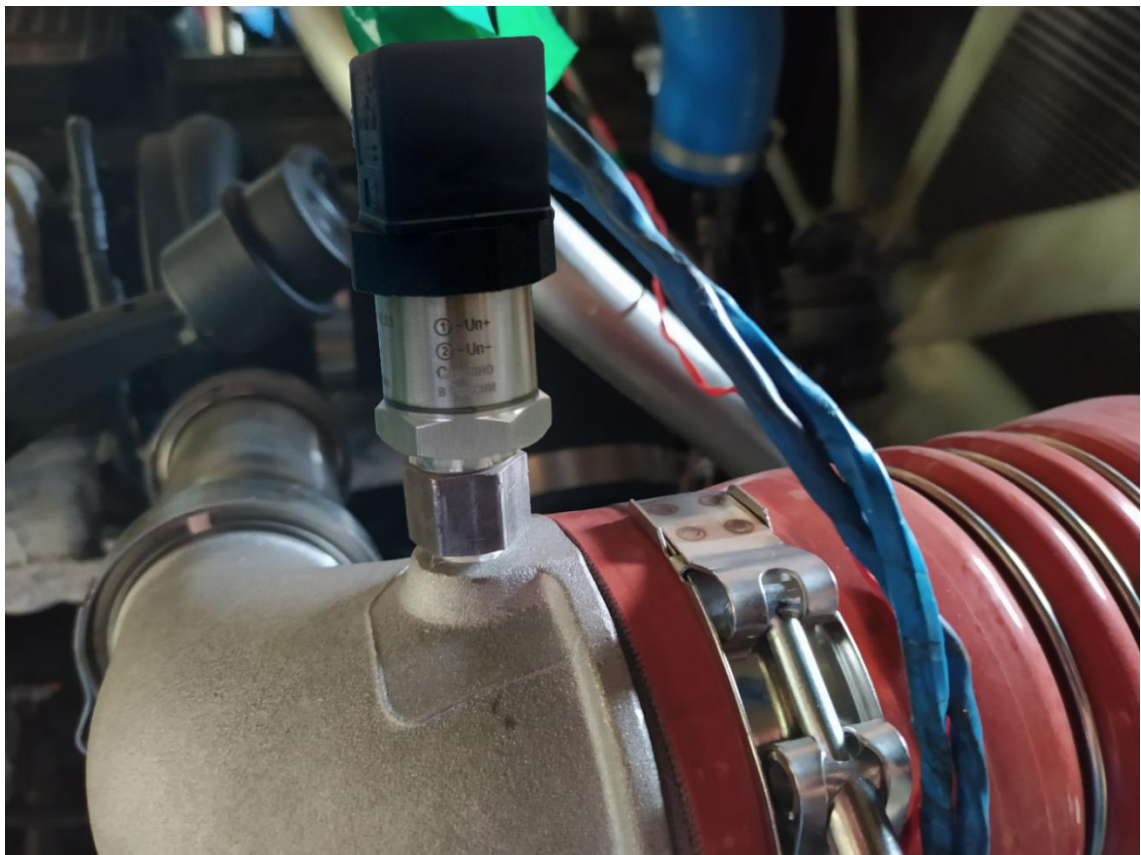


Рисунок 39 – Установка датчика ПД100И-ДА1,0-111-0,25 на впускную магистраль двигателя

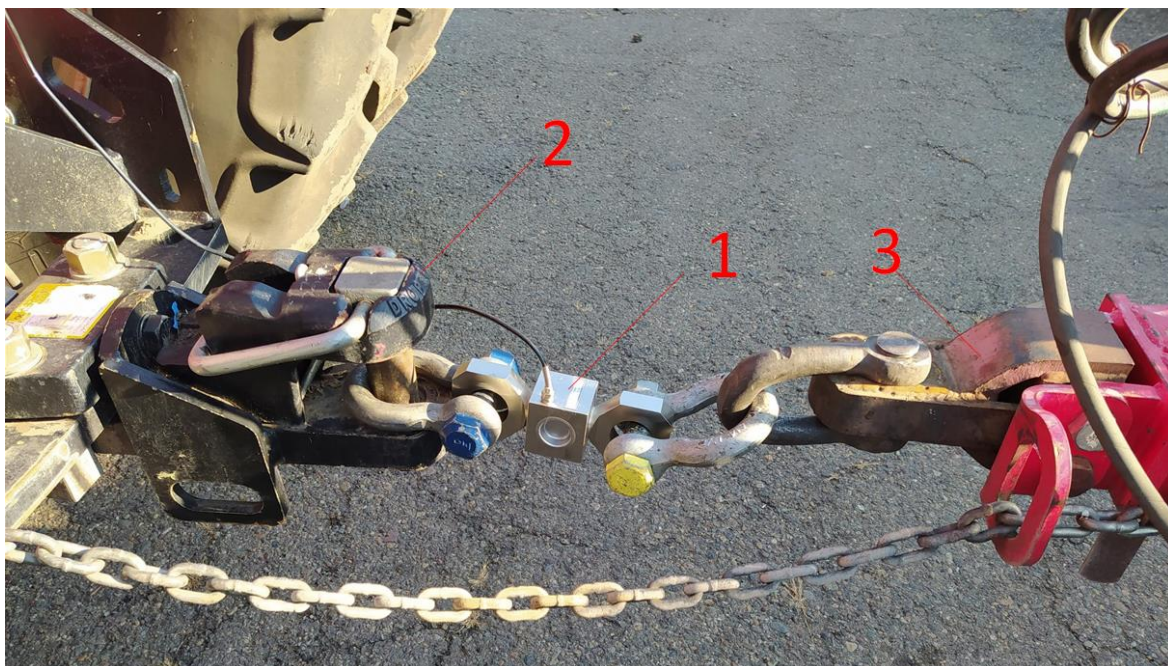
3.1.2 Разработка устройства для измерения тягового сопротивления сельскохозяйственного орудия

Для измерения тягового сопротивления сельскохозяйственного орудия применялся силоизмерительный тензорезисторный датчик Мерадат К-20Г-10-С3 производства ООО НПП «Системы контроля».

Датчик предназначен для преобразования воздействующей на него растягивающей силы в нормированный электрический сигнал. Для измерения тягового сопротивления сельскохозяйственного орудия, датчик 1 одним концом присоединяется к ТСУ трактора 2, а другим – к прицепной снице орудия 3 (рисунок 40). Измеряемое усилие, воздействующее через силовыводящий узел на упругий элемент датчика, вызывает появление деформации в местах наклейки тензорезисторов. На диагональ питания подается питающее напряжение, с диагонали измерения снимается выходное напряжение. Деформация упругого элемента вызывает изменение сопротивления тензорезисторов, которое преобразуется мостовой электрической схемой в выходной сигнал. Краткая техническая характеристика силоизмерительного тензорезисторного датчика Мерадат К-20Г-10-С3 приведена в таблице 5.

Таблица 5 – Краткая характеристика силоизмерительного тензорезисторного датчика Мерадат К-20Г-10-С3

Наименование показателя	Значение показателя
Наибольший предел измерения (НПИ), т	10
Класс точности по ГОСТ 8.631–2013 [30]	С3
Рабочий коэффициент передачи (РКП), мВ/В	1,8007
Входное электрическое сопротивление, Ом	404,3
Выходное электрическое сопротивление, Ом	352,6
Допустимая перегрузка в течение не более 30 мин, % от НПИ	25
Разрушающая нагрузка, % от НПИ	200
Рекомендуемое напряжение питания, В	5...12
Потребляемая мощность, Вт	0,5
Рабочий диапазон температур окружающей среды, °С	минус 30...+50
Масса, кг	4,1



1 – силоизмерительный тензорезисторный датчик Мерадат К-20Г-10-С3; 2 – ТСУ трактора Versatile 2375; 3 – прицепная сница дисковой бороны Challenger Sunflower 1435-29

Рисунок 40 – Установка силоизмерительного тензорезисторного датчика Мерадат К-20Г-10-С3 на МТА

3.1.3 Измерительно-регистрирующая аппаратура и программное обеспечение

Для организации приема данных от датчиков, применялась измерительная информационная система ИП-264 [104, 112] разработки КубНИИТиМ (рисунок 41).

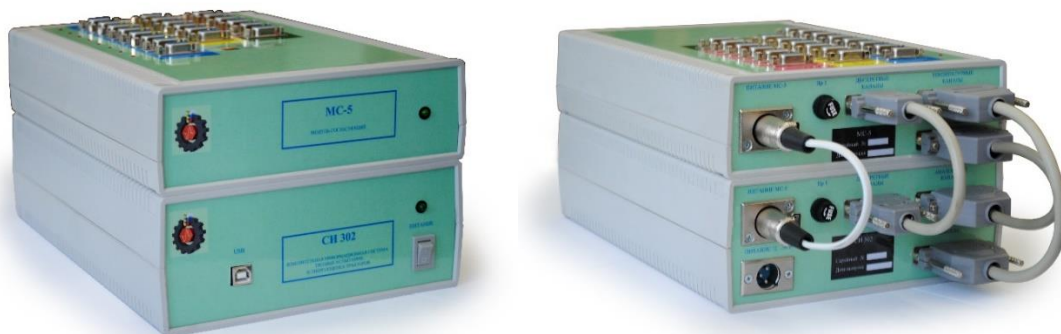


Рисунок 41 – Измерительная информационная система ИП-264

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

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

В состав системы входит ноутбук с программным обеспечением «Исследователь» [90]. Программа «Исследователь» (рисунок 42) функционирует в среде "Windows XP/Vista/7/8" и предназначена для реализации функциональных возможностей измерительной информационной системы ИП-264.

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.



Рисунок 42 – Окно проведения опыта при измерении тягового сопротивления

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 6.

Таблица 6 – 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

3.2 Программа и методика экспериментальных исследований метода инструментального контроля скорости движения и буксования колес трактора

Для проверки работоспособности разработанного метода определения буксования движителей трактора с помощью одночастотного приемника GNSS в программу экспериментальных исследований 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 [25, 29, 66, 138];
- оценка возможности применения нового метода определения буксования движителей трактора в условиях реальной эксплуатации.

Место проведения исследований – валидационный полигон Новокубанского филиала ФГБНУ «Росинформагротех» (КубНИИТиМ). Условия проведения – реально сложившиеся на момент проведения исследований.

Для реализации поставленных в программе исследований задач необходимо дополнительно 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 ГОСТ 30745 [25] и ISO 789-9 [138];
- 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.

3.2.1 Разработка устройства для 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 43).

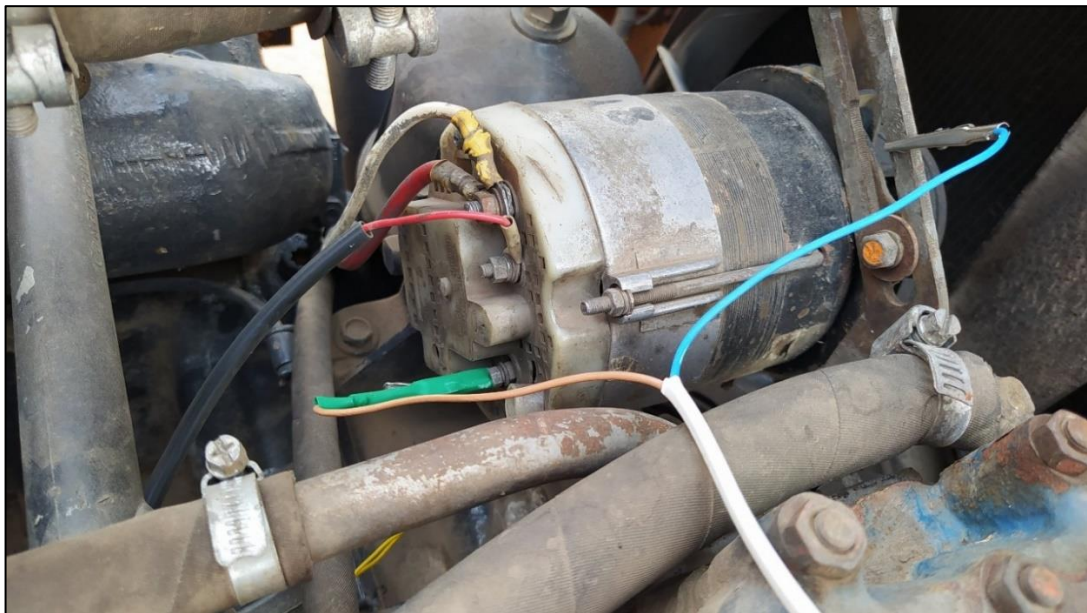


Рисунок 43 – Подключение к фазовой обмотке электрического генератора двигателя ЯМЗ-238НД трактора К-700А

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 44).



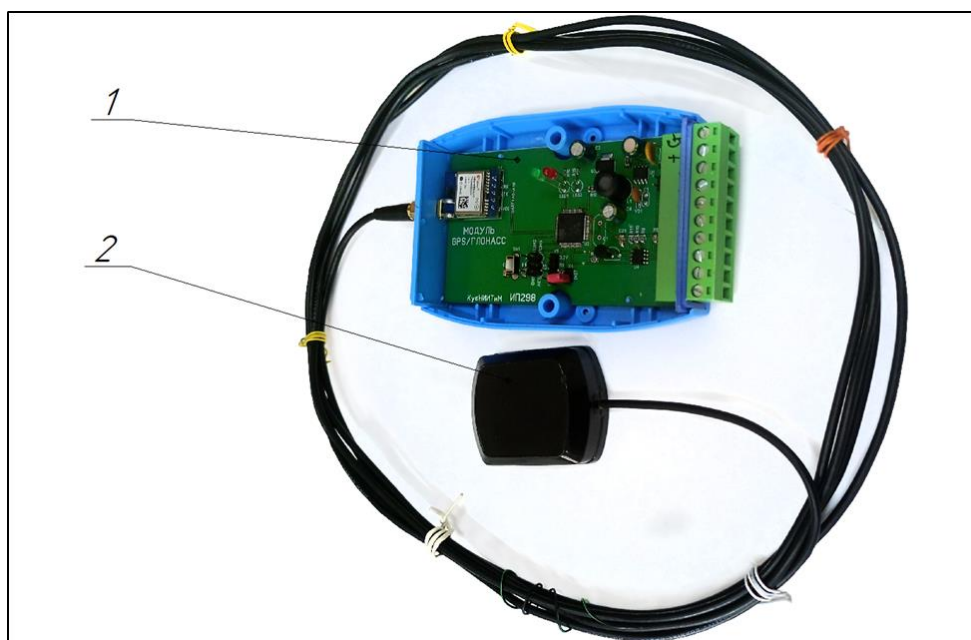
Рисунок 44 – Установка пьезоэлектрического датчика на топливопровод высокого давления двигателя ЯМЗ-238НД трактора К-700А

Для определения количества оборотов ведущих колес трактора по ГОСТ 30745 и ISO 789-9, использовались беспроводные датчики буксования ИП-291, разработанные КубНИИТиМ (рисунок 45) [102].



Рисунок 45 – Установка беспроводного датчика буксования ИП-291 на ведущее колесо трактора К-700А

Для определения фактической скорости движения разработан одночастотный модуль-приемник ГНСС ИП-298 (рисунок 46).



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

Рисунок 46 – Одночастотный модуль-приемник GNSS ИП-298

3.2.2 Измерительно-регистрирующая аппаратура и программное обеспечение

Для организации приема данных от датчиков, также применялась измерительная информационная система ИП-264 разработки КубНИИТиМ, дополнительно оборудованная модулем беспроводной связи для подключения беспроводных датчиков буксования ИП-291.

Также, для проведения экспериментальных исследований, был разработан специальный программный модуль к ПО «Исследователь», позволяющий ИИС ИП-264 работать с приемниками ГНСС (рисунок 47)

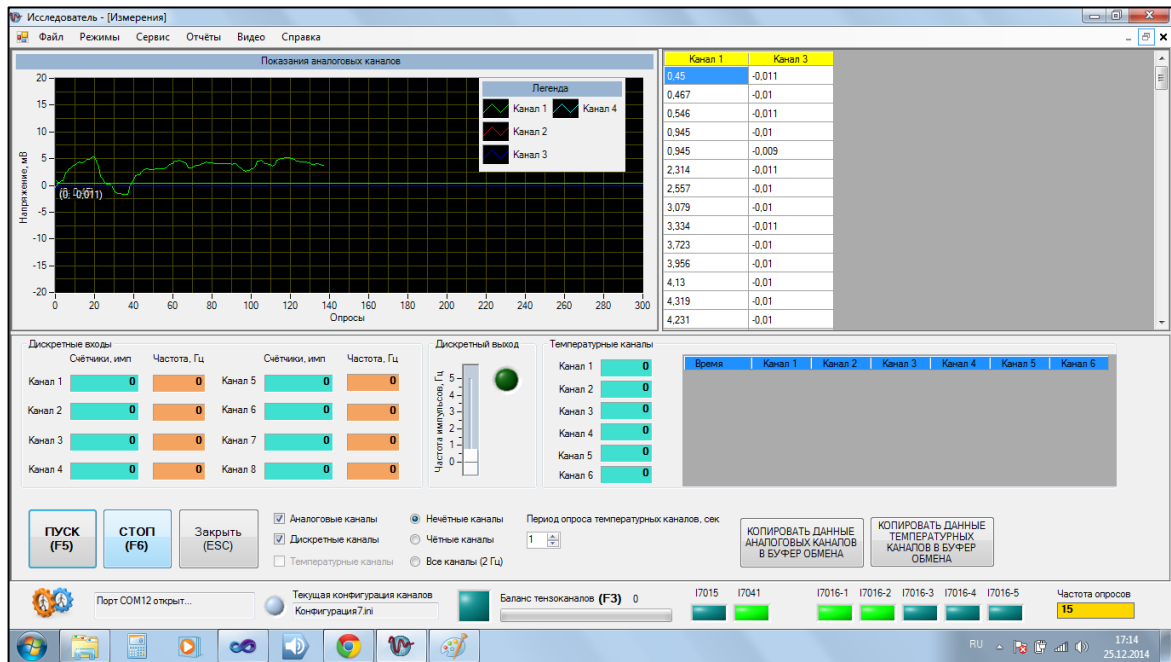


Рисунок 47 – Окно проведения опыта при измерении буксования

3.3 Выводы по главе

1. Разработана общая методика экспериментальных исследований, включающая в себя практическое определение основных целевых показателей работы МТА (степень использования мощности двигателя, фактическая скорость движения и буксование колес трактора) по разработанным и стандартным методам.
2. Разработано оборудование, позволяющее проводить параллельное определение основных целевых показателей работы МТА (степень использования мощности двигателя, фактическая скорость движения и буксование колес трактора) по разработанным и стандартным методам.
3. Программа и методика проведения экспериментальных исследований составлена с учетом требований ГОСТ Р 52777-2007, ГОСТ 7057-2001, ГОСТ 30745-2001, ISO 789-9:2018 и предназначена для определения и контроля основных показателей работы МТА в режиме реального времени.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты экспериментальных исследований зависимости давления наддува во впускной магистрали двигателя от нагрузки на трактор во время выполнения технологической операции

Для оценки возможности получения информации о энергетических параметрах работы МТА при выполнении технологического процесса, произведены замеры давления наддувочного воздуха во впускном коллекторе двигателя трактора Versatile 2375. Замеры производились при выполнении лущения стерни озимой пшеницы (первый проход) дисковой бороны Challenger Sunflower 1435-29 в агрегате с трактором Versatile 2375. В качестве эталонного показателя принималось значение тягового сопротивления, оказываемого орудием. Значения давления наддува и тягового сопротивления регистрировались синхронно с частотой 20 Гц. В качестве устройства регистрации применялась измерительная информационная система ИП-264.

На рисунке 48 представлен участок диаграмм значений измеряемых показателей, гистограммы распределения (рисунки 49, 50) и графики спектральных плотностей (рисунок 51) на режиме заглабления рабочих органов дисковой бороны и начале устойчивого выполнения технологического процесса.



Рисунок 48 – Диаграммы значений тягового сопротивления бороны Challenger Sunflower 1435-29 и давления турбонаддува двигателя трактора Versatile 2375 на лушении стерни озимой пшеницы

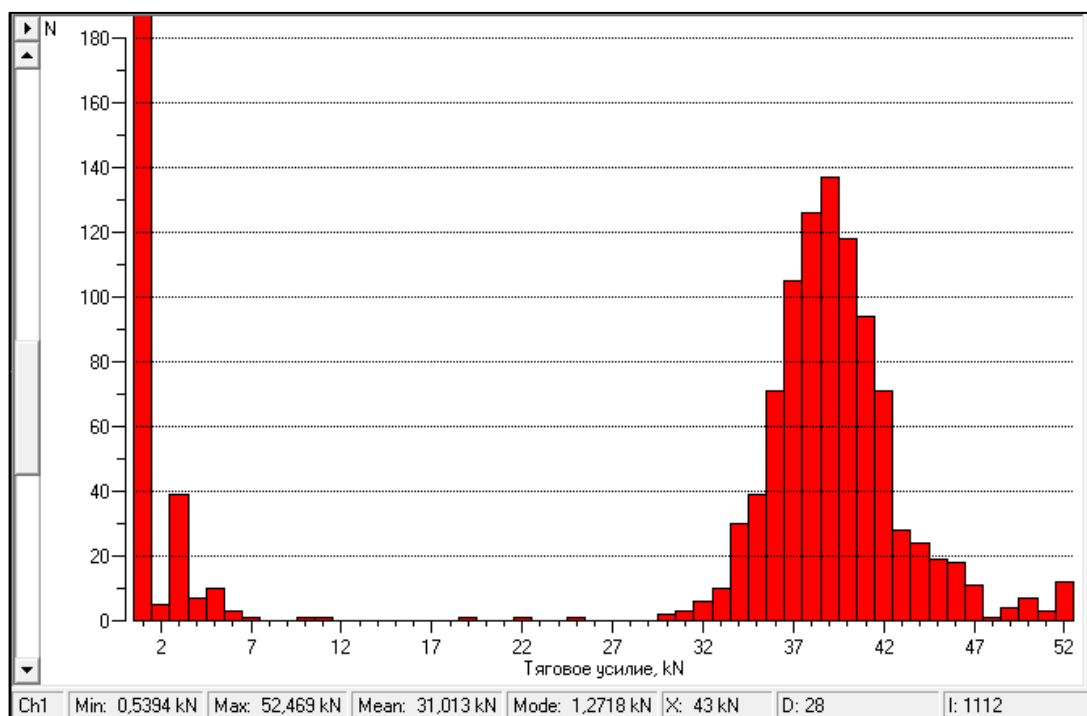


Рисунок 49 – Гистограмма распределения значений тягового сопротивления бороны Challenger Sunflower 1435-29 на лушении стерни озимой пшеницы

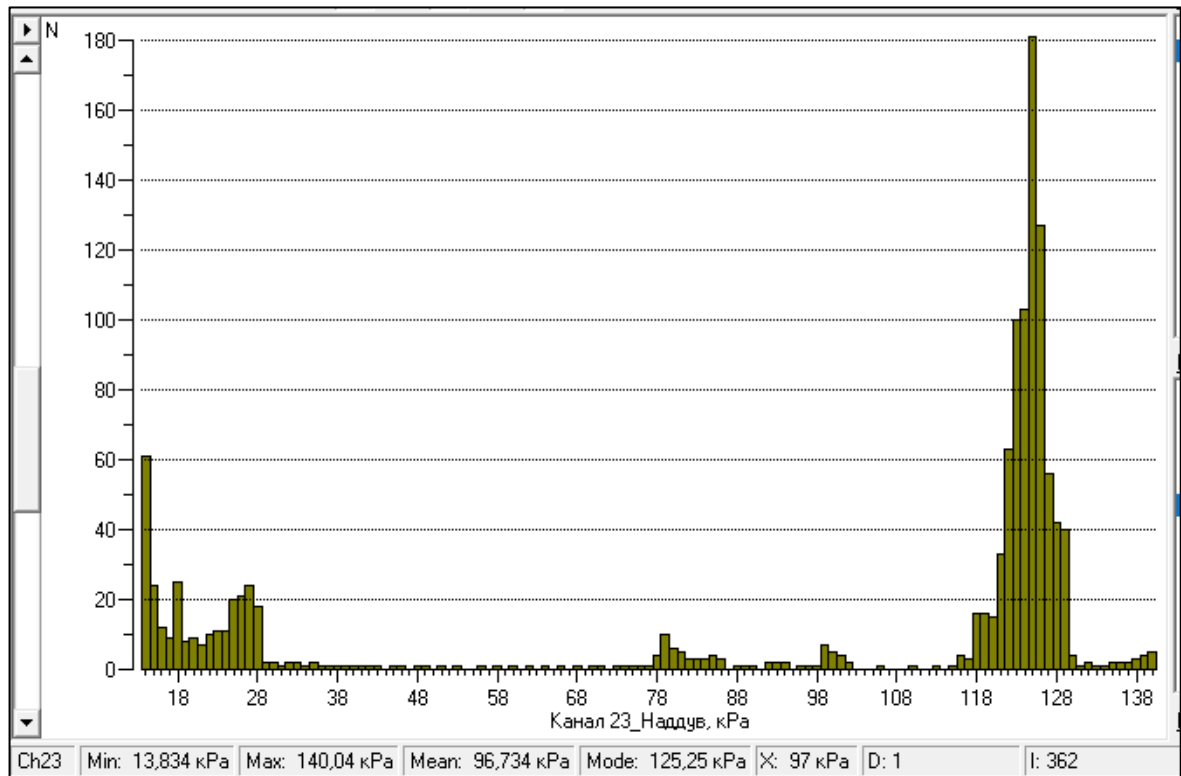


Рисунок 50 – Гистограмма распределения значений давления наддува двигателя трактора Versatile 2375 на лушении стерни озимой пшеницы

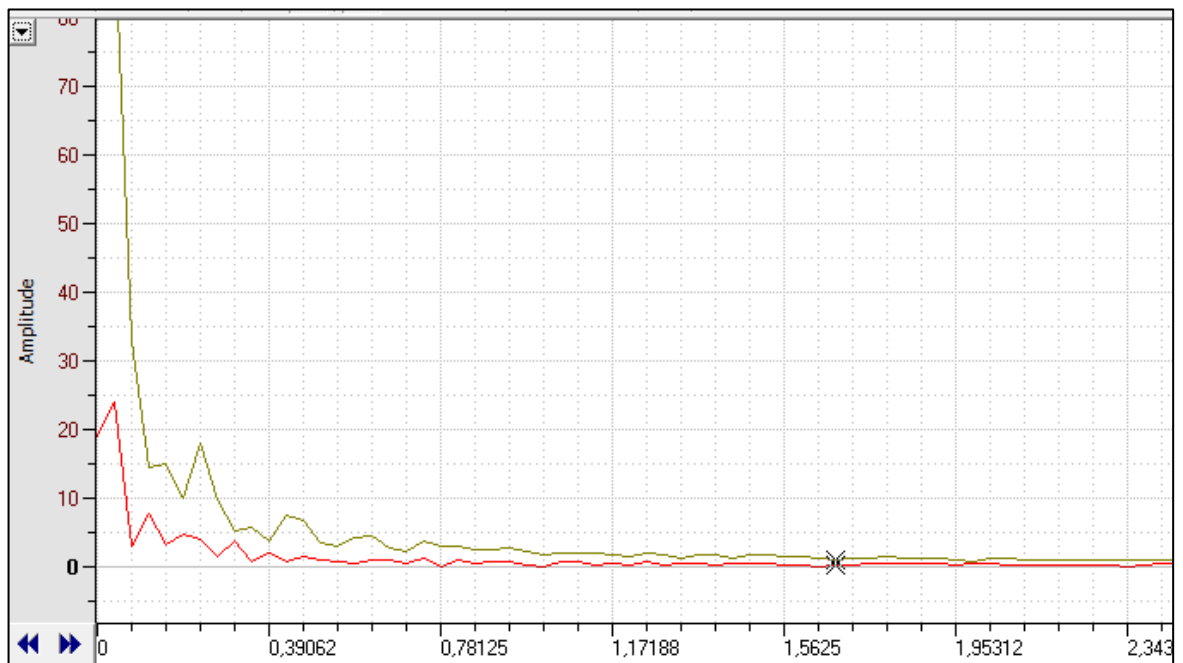


Рисунок 51 – Спектральные плотности изменения давления наддува двигателя трактора Versatile 2375 и тягового сопротивления бороны Challenger Sunflower 1435-29 на лушении стерни озимой пшеницы

В результате анализа полученных данных следует, что характер изменения значений давления наддува достаточно точно повторяет колебания тягового сопротивления, оказываемого бороной, хотя на режиме заглубления рабочих органов, рост давления наддува несколько запаздывает от роста тягового сопротивления. На установившемся режиме работы, значения тягового сопротивления орудия и давления наддува трактора подчиняются нормальному закону распределения.

Спектральный анализ амплитудно-частотных характеристик тягового сопротивления и давления наддува показал, что частота значимых воздействий не превышает 2 Гц. Расчет данных, полученных в результате опыта, показал, что коэффициент корреляции значений давления во впускном коллекторе и тягового сопротивления орудия, на режиме динамического наброса нагрузки во время заглубления рабочих органов, составил 0,895.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой степени зависимости значения давления наддува от тягового сопротивления орудия и, соответственно, нагрузки на двигатель трактора.

4.2 Сравнительная оценка результатов определения энергетических показателей работы МТА по разработанному и стандартному методам

Сравнительная оценка нового метода определения энергетических показателей работы МТА по давлению наддува проводилась с целью установления сходимости значений тягового сопротивления, полученного расчетным методом по формулам (9) и (30) и измеренного с помощью силоизмерительного тензорезисторного датчика Мерадат К-20Г-10-С3.

Замеры производились при выполнении дискового лущения пожнивных остатков кукурузы (второй проход) дисковой бороной Challenger Sunflower 1435-29 в агрегате с трактором Versatile 2375 (рисунок 52).



Рисунок 52 – Дисковая борона Challenger Sunflower 1435-29 в агрегате с трактором Versatile 2375 на лущении пожнивных остатков кукурузы

Краткая техническая характеристика трактора Versatile 2375 представлена в таблице 7, краткая техническая характеристика дисковой бороны Challenger Sunflower – в таблице 8.

Таблица 7 – Краткая техническая характеристика трактора Versatile 2375

Наименование показателя	Значение показателя
Тип движителя	колесный
Номинальная мощность двигателя, л.с.	375
Рабочий объем двигателя, л	10,8
Число передач вперед/назад	12/4
Емкость топливного бака, л	871
Обороты ВОМ, об/мин	1000
Производительность гидросистемы, л/мин.	170
Длина/высота трактора, мм	6750/3720
Колея, мм:	
- внешние колеса	3260
- внутренние колеса	1830
Дорожный просвет, мм	430
Масса, кг	11690
Изготовитель	ООО "КЗ "Ростсельмаш", г. Ростов-на-Дону

Таблица 8 – краткая техническая характеристика дисковой бороны Challenger Sunflower 1435-29

Наименование показателя	Значение показателя
Тип изделия	прицепная двухрядная
Агрегатирование	кл. 6-7
Рабочая скорость движения, км/ч	до 12
Ширина захвата, м	8,9
Масса, кг	7380
Глубина обработки почвы, см	до 15
Угол атаки, ...°	
- переднего ряда	20
- заднего ряда	19
Тип рамы	Х-образная
Подвеска дисков к раме	батарейная
Тип дисков	сферические гладкие
Количество рядов дисков, шт.	2
Число дисков, шт.	82
Диаметр диска, мм	610
Нагрузка на диск, кг	90
Дополнительные рабочие органы	пружинные боронки
Изготовитель	корпорация «AGCO», США

Для расчета энергетических и топливно-экономических показателей работы МТА по давлению наддува, на испытательном стенде ФГБУ «Кубанская МИС» были получены регуляторные и комбинированная характеристики двигателя Cummins QSM-11 (рисунки 53, 54).

Диаграммы значений тягового сопротивления бороны, давления наддува и мощности двигателя, рассчитанной по регуляторной характеристике, представлены на рисунке 55.

Результаты сравнительной оценки нового метода определения энергетических показателей работы МТА по давлению наддува представлены в таблице 9.

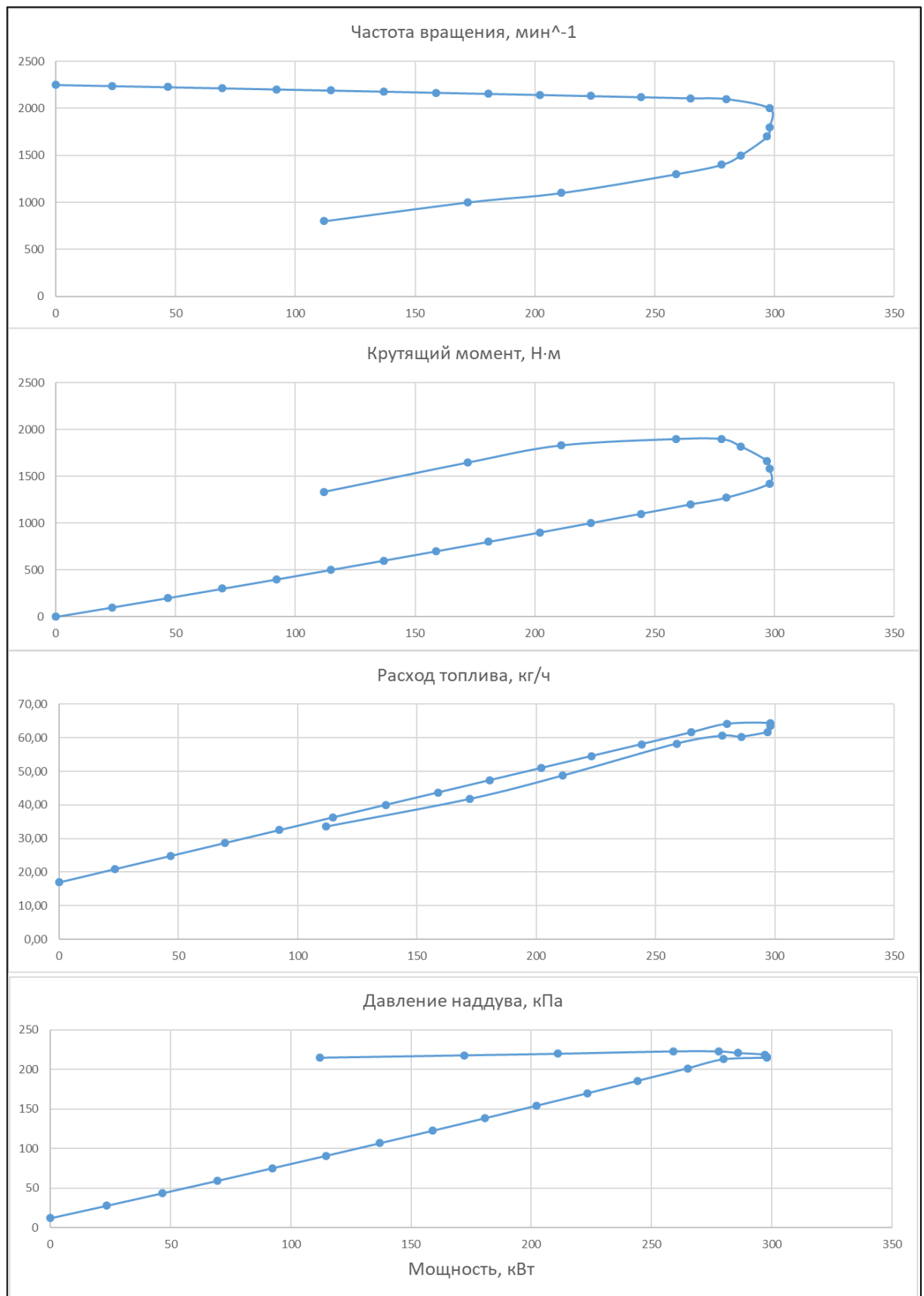


Рисунок 53 – Регуляторные характеристики двигателя Cummins QSM-11

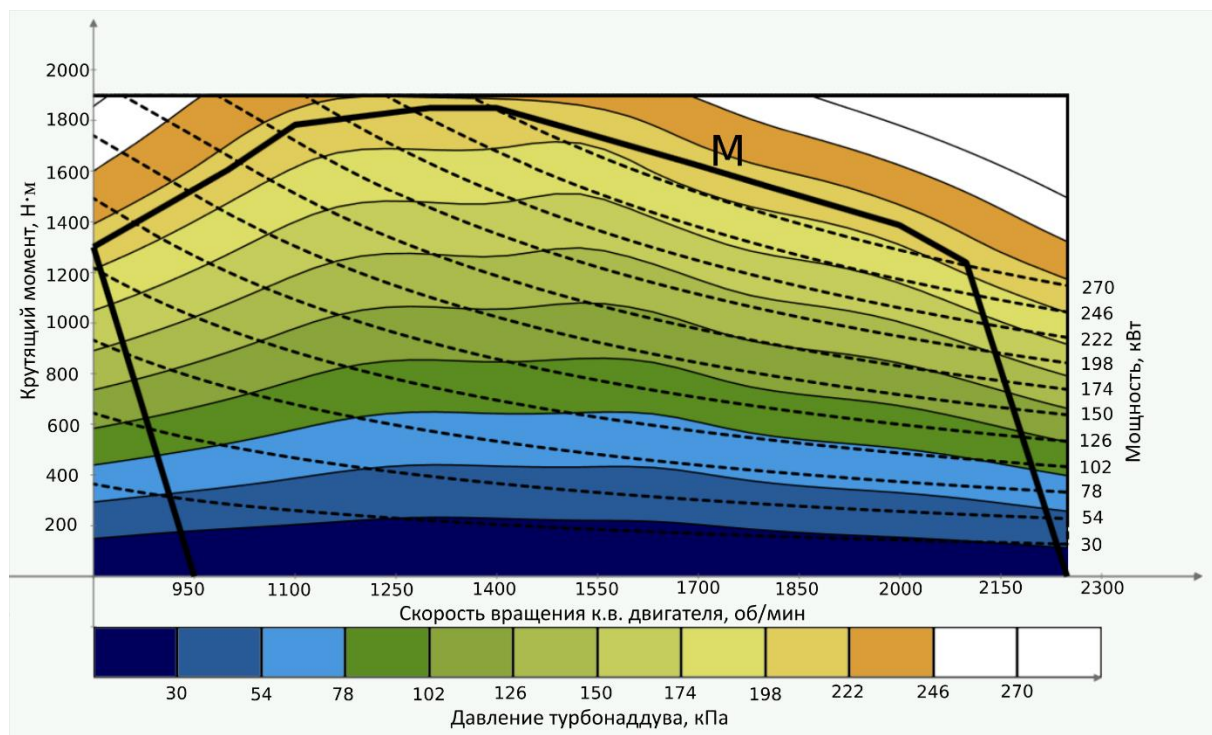


Рисунок 54 – Комбинированная характеристика двигателя Cummins QSM-11

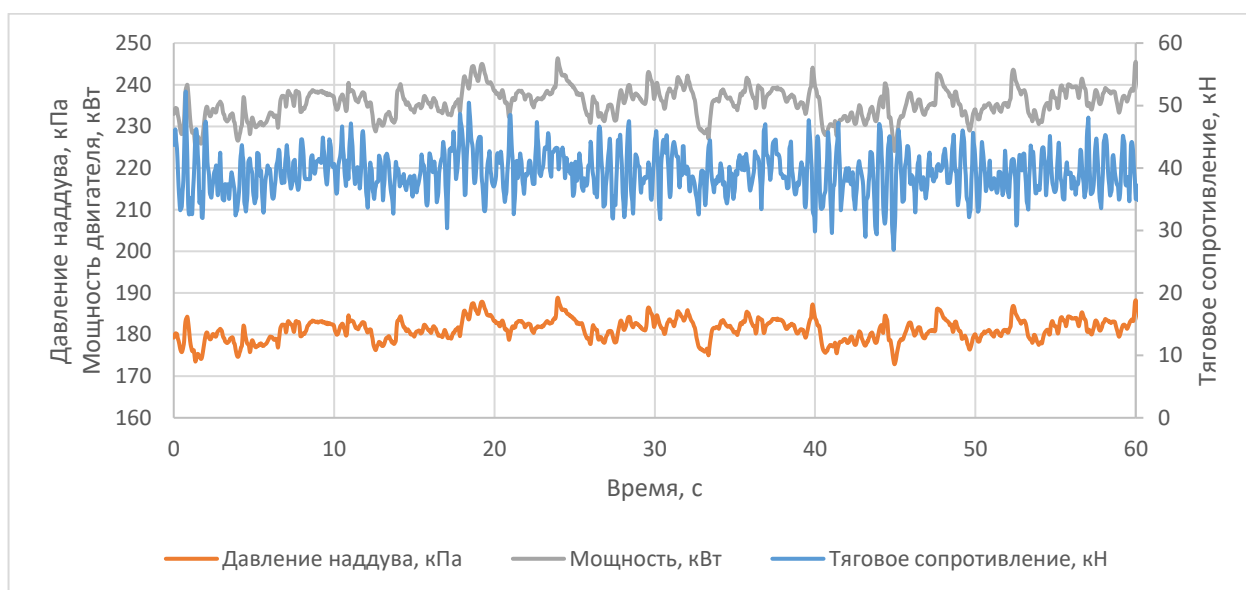


Рисунок 55 – Диаграммы значений тягового сопротивления борона Challenger Sunflower 1435-29, давления наддува и расчетной мощности двигателя трактора Versatile 2375 на луцении пожнивных остатков кукурузы (второй след)

Таблица 9 – Результаты оценки точности нового метода определения энергетических показателей МТА по давлению наддува

Показатель	Значение показателя по методу	
	По давлению наддува	Тензометрирование
Марка машины	Борона дисковая Challenger Sunflower 1435-29	
Агрегатирование	Versatile 2375	
Вид работы	Лущение пожнивных остатков кукурузы, второй след	
Дата, место выполнения работы	09.09.2020 Валидационный полигон КубНИИТиМ	
Поступательная скорость движения агрегата, км/ч	11,9	11,9
Рабочая ширина захвата, м	7,8	7,8
Производительность агрегата, га/ч		
- основного времени	9,3	9,3
- сменного времени	-	-
Средняя глубина хода рабочих органов, см	6,7	6,7
Давление наддува во время основной работы, кПа:		
- среднее	181,29	-
- среднеквадратическое отклонение	2,51	-
Тяговое сопротивление, кН		
- среднее	37,39	39,28
- среднеквадратическое отклонение		3,48
Расход топлива, кг/ч		
- за 1 час основного времени	58,1	-
- за 1 час сменного времени	-	-
Мощность, кВт:		
- потребляемая машиной	127,39	129,8
- потребляемая агрегатом:		
- среднее	238,31	-
- среднеквадратическое отклонение	3,50	-
- потребляемая на самопередвижение трактора, кВт	110,92	-
Удельные энергозатраты, МДж/га	269,38	

По результатам проведения сравнительной оценки нового метода определения энергетических показателей работы МТА по давлению наддува, можно сделать выводы о высокой сходимости значений энергетических показателей работы МТА, полученных новым и стандартными методами. Расхождение между значением тягового сопротивления, полученным расчетным методом по измеренным значениям давления наддува и значением тягового

сопротивления, полученным прямыми измерениями составило 1,86 %. В то же время, сравнительная оценка показала, что новый метод позволяет получить значительно более полную картину мощностных и топливно-экономических показателей работы МТА, чем стандартный метод измерения тягового сопротивления. В отличие от стандартного метода расчета энергетических показателей работы МТА по расходу топлива [29], новый метод позволяет определять динамическую составляющую энергетических параметров работы МТА и их мгновенные значения в реальном режиме времени.

4.3 Применение метода определения загрузки двигателя по давлению наддува для выбора оптимального режима работы МТА

Для анализа энергоэффективности выбранного механизатором режима работы МТА Versatile 2375 + Challenger Sunflower 1435-29 на лущении пожнивных остатков кукурузы, использовались комбинированные характеристики двигателя Cummins QSM-11, представленная на рисунках 31 и 54, а также, в представлении значений удельного расхода топлива в координатах частоты вращения и крутящего момента двигателя (рисунок 56). На диаграмму значений удельного расхода топлива, также наложены изолинии равных мощностей (пунктирные линии на рисунках 31, 54 и 56) и график внешней характеристики крутящего момента, определяемый настройками регулятора и ограничивающий область возможной работы двигателя (линия М на рисунках 31, 54 и 56).

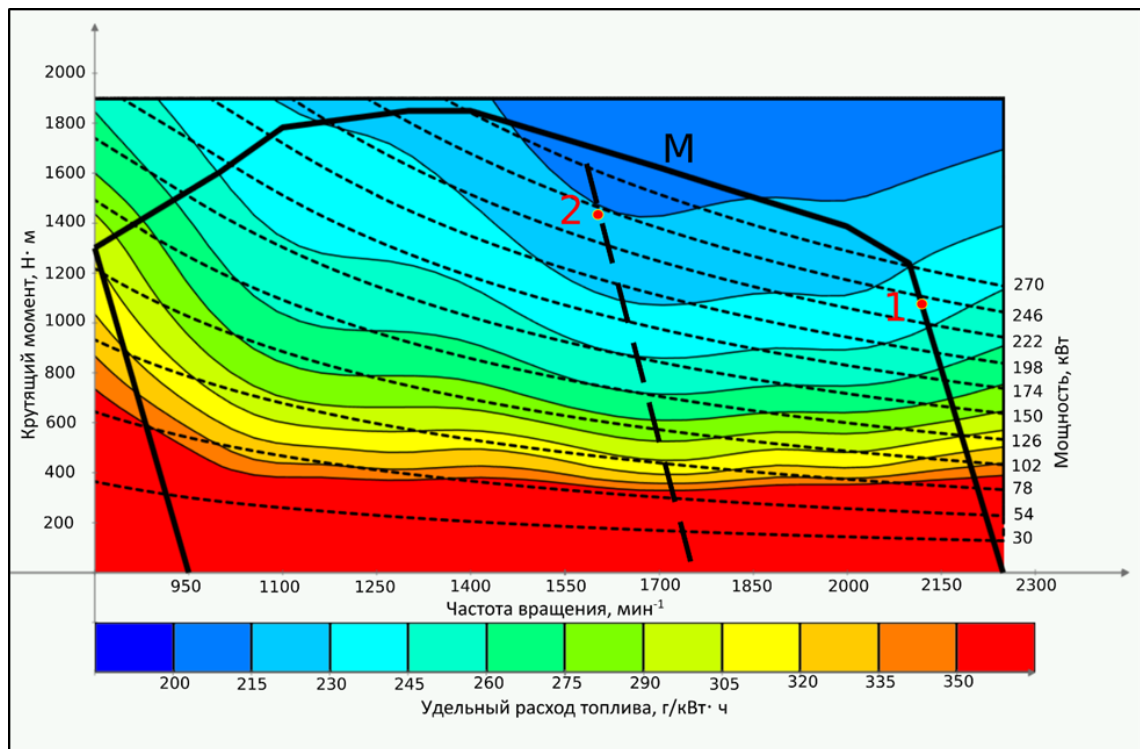


Рисунок 56 – Комбинированная характеристика двигателя Cummins QSM-11

Во время работы трактора на 4 передаче среднего диапазона, положении акселератора, соответствующем максимальной частоте вращения (работа по внешней характеристике, линия M), средней поступательной скорости движения 11,9 км/ч и потребляемой мощности 238,31 кВт, режим работы двигателя соответствует точке 1 на рисунке 56. Частота вращения коленчатого вала двигателя при этом составляет 2130 мин⁻¹, а удельный расход топлива — 244 г/кВт·ч. На рисунке 56 видно, что для данной мощности (с не меньшим запасом крутящего момента, обеспечивающем работу без выхода на корректорный участок характеристики), обеспечивается при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹, но при более низком удельном расходе топлива (минимум удельного расхода топлива для данной мощности соответствует частоте вращения 1600 мин⁻¹ и составляет 203 г/кВт·ч (точка 2 на рисунке 56)). Принимая буксование движителей постоянной величиной и зная расчетные скорости движения на передачах при номинальной частоте вращения, возможно рассчитать, что при переходе на 1 передачу повышенного диапазона и

одновременном снижении частоты вращения коленчатого вала до 1600 мин⁻¹, будет обеспечиваться та же поступательная скорость ≈ 12 км/ч.

Таким образом, расчеты показывают, что при альтернативном режиме работы следует ожидать повышения топливной экономичности на 17% при сохранении производительности. Для проверки расчетных данных, была проведена эксплуатационно-технологическая оценка (ЭТО) работы агрегата на альтернативном режиме.

Эксперимент показал, что агрегат устойчиво выполняет технологический процесс на расчетном режиме. Сравнительные результаты ЭТО на базовом и альтернативном режиме представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты ЭТО при работе агрегата на базовом и альтернативном режиме

Показатель	Значение показателя на режиме:	
	базовый	альтернативный
Марка машины	Борона дисковая Challenger Sunflower 1435-29	
Агрегатирование	Versatile 2375	
Вид работы	Лущение пожнивных остатков кукурузы, второй след	
Дата, место выполнения работы	Валидационный полигон КубНИИТиМ	
	10.09.2020	10.09.2020
Рабочая скорость движения агрегата, км/ч	11,9	12,1
Рабочая ширина захвата, м	7,8	7,8
Производительность агрегата, га/ч:		
- основного времени	9,3	9,4
- сменного времени	7,5	7,5
Средняя глубина хода рабочих органов, см	6,7	6,7
Удельный расход топлива за 1 ч сменного времени, кг/га	5,7	5,0
Удельные энергозатраты, МДж/га	245,78	215,60

Эксплуатационно-технологическая оценка показала, что применение альтернативного режима, позволило снизить энергозатраты на выполнение технологической операции на 12 %.

4.4 Результаты экспериментальных исследований разработанного метода инструментального контроля скорости движения и буксования колес трактора

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 57). На тракторе были установлены шины 28,1R26, работа выполнялась на III диапазоне 2-й передачи.



Рисунок 57 – 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 58.

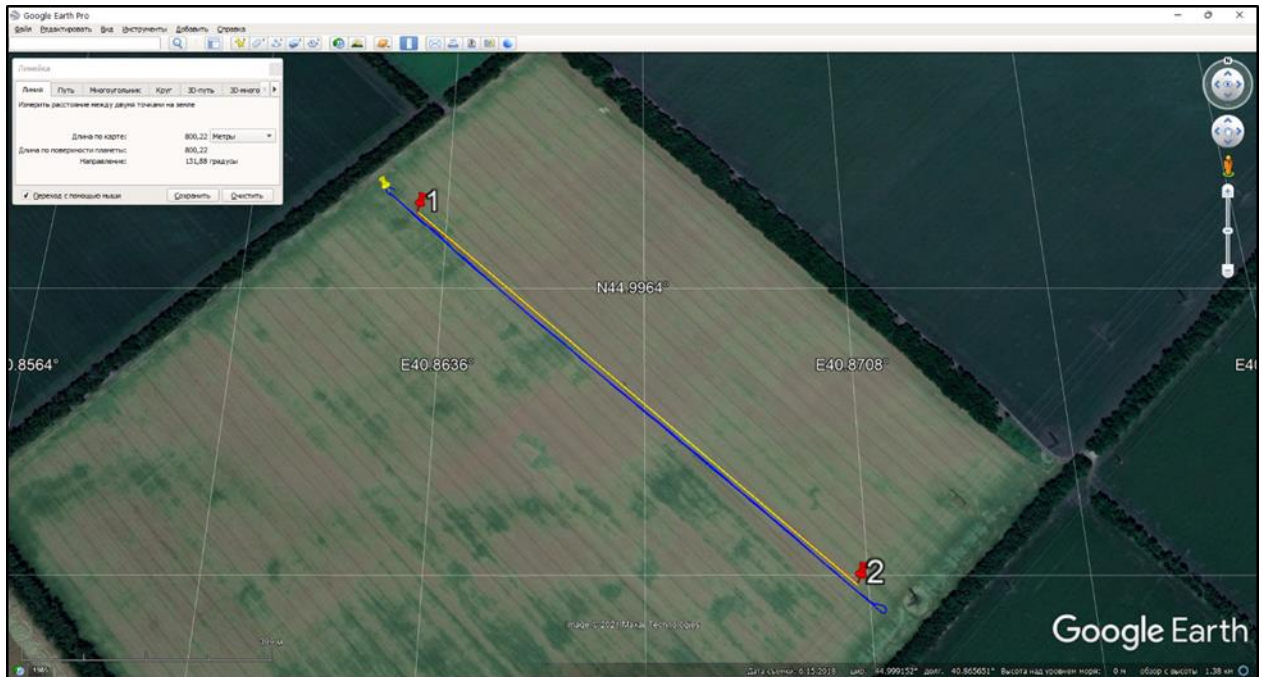


Рисунок 58 – Рабочий проход агрегата во время проведения полевого эксперимента

Во время первого прохода регистрировались с интервалом 100 м значения n'_{ki} для расчета буксования по формуле (32) и, с интервалом 1 с., значения $v'_{\text{факт}}$ и n'_e для расчета коэффициента k' по формуле (36).

Во время второго прохода, на тех же участках поля регистрировались значения n_{ki} для расчета буксования по формуле (32) и, с интервалом 1 с., значения $v_{\text{факт}}$ и n_e для расчета буксования по формулам (2) и (35).

На рисунке 59 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 60, 61). Поэтому, при дальнейшей обработке, первичные данные подвергались медианной фильтрации с

размером плавающего окна 10 значений. Результаты фильтрации также представлены на рисунке 59.

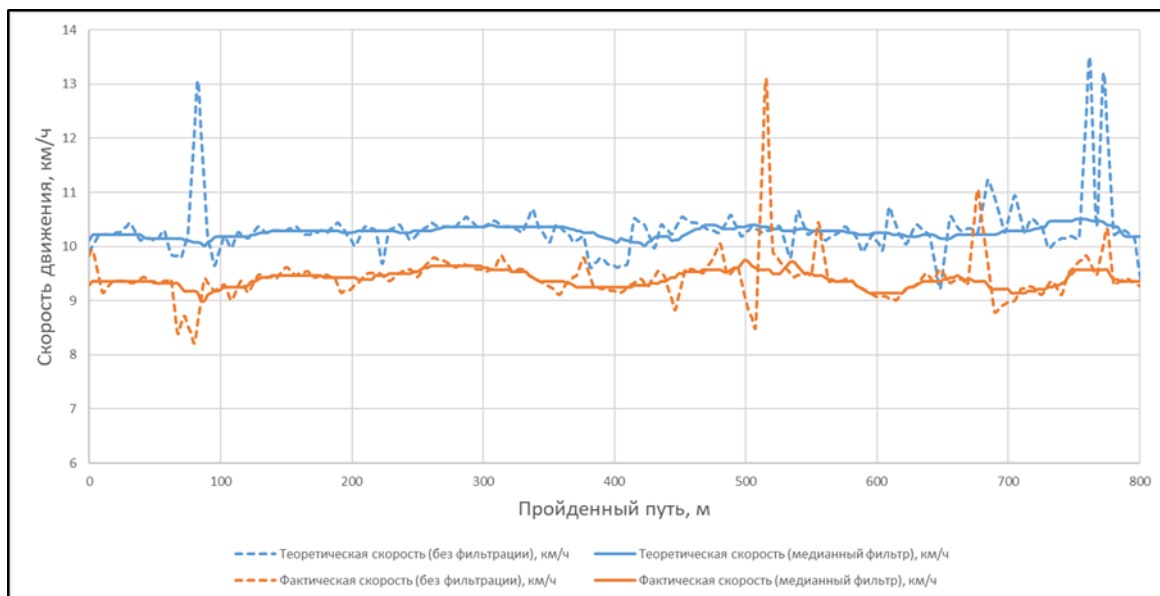


Рисунок 59 – Результаты определения теоретической и фактической скоростей движения агрегата

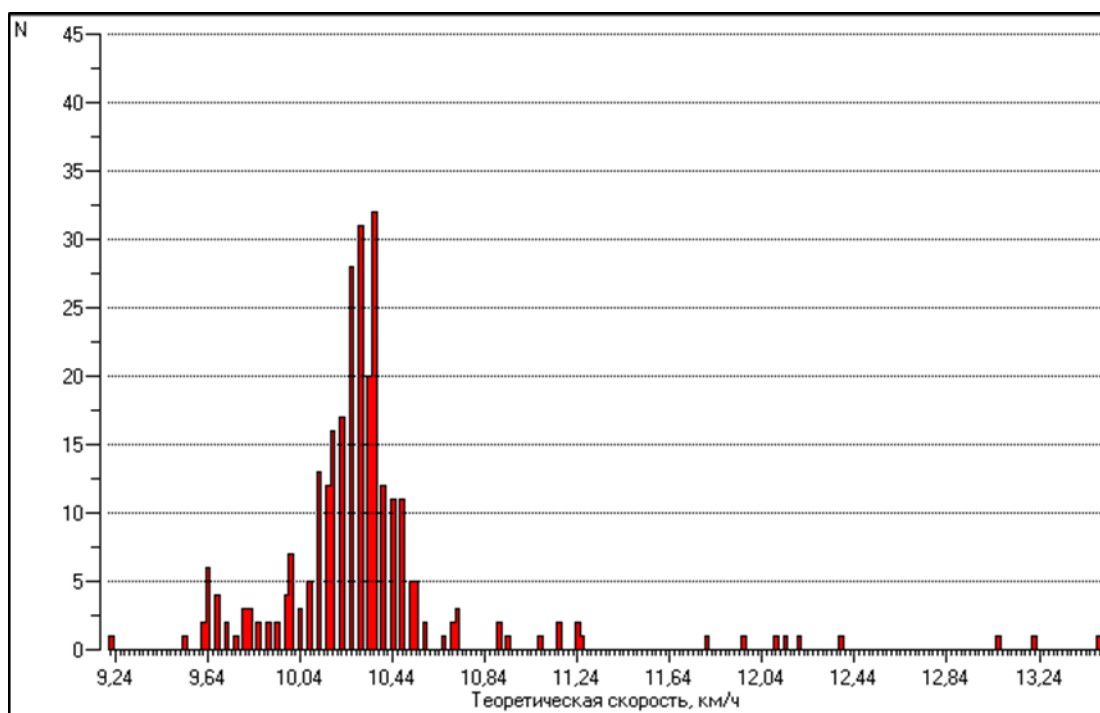


Рисунок 60 – Гистограмма распределения измеренных значений теоретической скорости

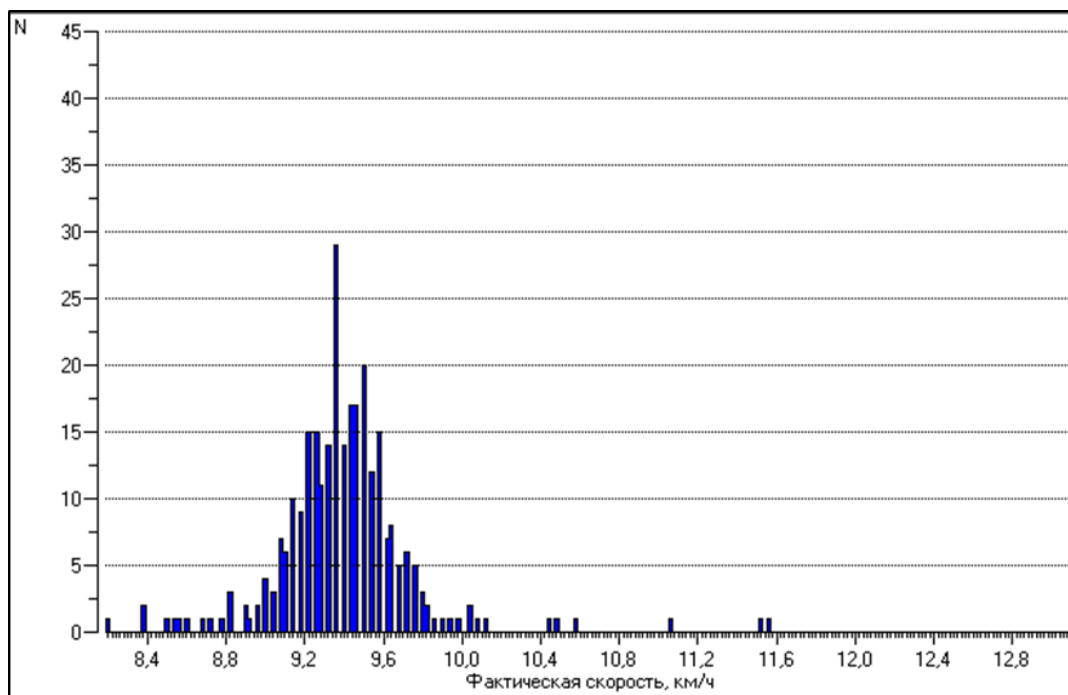


Рисунок 61 – Гистограмма распределения измеренных значений фактической скорости

Итоговые результаты обработки первичных данных и значения буксования трактора, определенные по новому методу и в соответствии с ISO 789-9, представлены на рисунке 62 и в таблице 11.

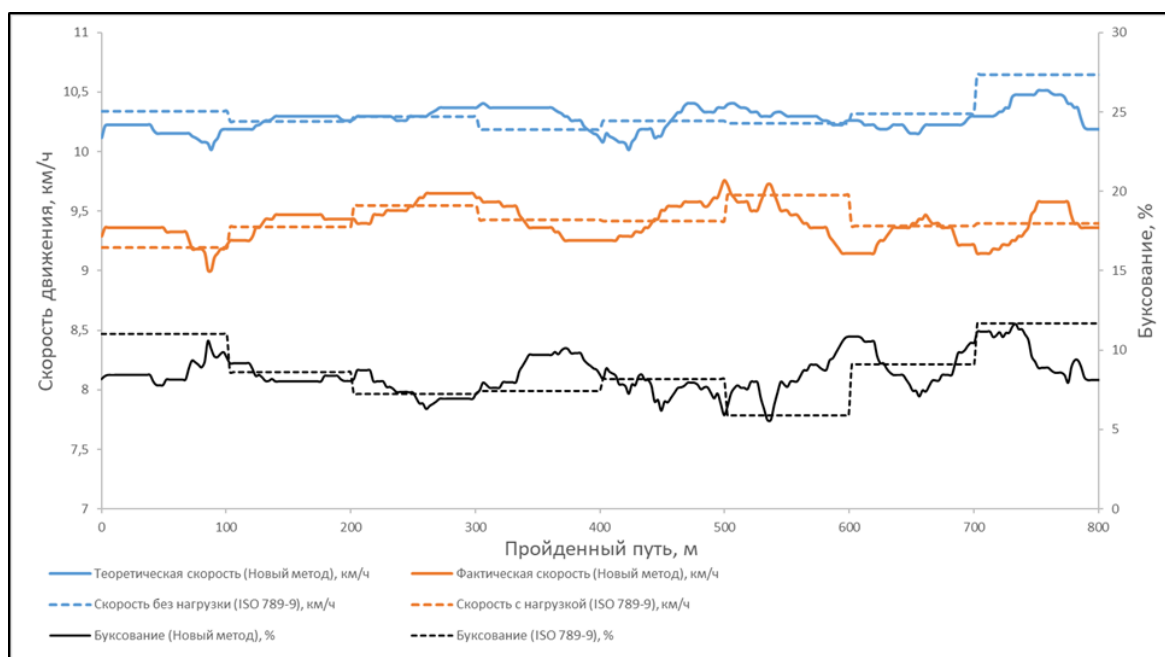


Рисунок 62 – Итоговые результаты определения буксования по стандартному методу ISO 789-9 и новому методу

Таблица 11 – Сравнительные результаты определения буксования

№ участ ка	Длина участка , м	Среднее значение буксования (%) на интервале (м) по методу:							
		100		200		400		800	
		GNSS	ISO	GNSS	ISO	GNSS	ISO	GNSS	ISO
1	100	8,66	10,04	8,52	9,83	8,35	8,42	8,52	8,65
2	100	8,39	8,62						
3	100	7,40	7,25	8,17	7,34				
4	100	8,94	7,43						
5	100	7,63	8,18	7,93	7,03	8,69	8,72		
6	100	8,23	6,89						
7	100	9,12	9,12	9,44	10,41				
8	100	9,77	11,70						
D[X]		0,61	2,20	0,44	2,94	0,06	0,05	-	-

Анализ результатов, представленных в таблице 11, показывает, что наибольшая сходимость результатов, полученных разными методами, наблюдается начиная с интервала 400 метров. Максимальное отклонение результатов измерения буксования не превысило 1,51 %. Однако можно заметить, что разброс значений, полученных с помощью разработанного метода, мало

зависит от длины интервала усреднения, в отличие от значений, полученных методом ISO. Таким образом подтверждаются результаты теоретических расчетов и моделирования точности измерений.

По результатам экспериментальных исследований, можно сделать вывод о работоспособности разработанного метода определения буксования движителей 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.

4.5 Выводы по главе

1. Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать выводы о правильности теоретических расчетов, проведенных при разработке метода определения энергетических показателей МТА посредством измерения давления наддува. Разработанный метод обеспечивает необходимую точность инструментального контроля связанных энергетических показателей в условиях обычной эксплуатации МТА и, по сравнению с общепринятыми методами, является более доступным и информативным.

2. Результаты экспериментальных исследований подтвердили достаточную точность определения как фактической скорости и буксования движителей трактора с помощью приемника ГНСС по разработанному методу и показали его преимущества по сравнению с общепринятыми.

3. Экспериментальные исследования подтвердили возможность повышения энергоэффективности выполнения сельскохозяйственных операций, за счет выбора режима работы МТА и конфигурации трактора, рассчитанных на основе мониторинга целевых показателей работы МТА с помощью разработанных методов.

4. Материалы, полученные в результате проведенных исследований, позволяют обосновать технические и метрологические требования к разработке телеметрической системы повышения энергоэффективности МТА при выполнении сельскохозяйственных операций.

ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Разработка телеметрической системы повышения энергоэффективности МТА

5.1.1 Концепция телеметрической системы повышения энергоэффективности МТА

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что для определения основных целевых показателей работы машинно-тракторного агрегата (текущая энергоемкость процесса, текущая производительность агрегата и буксование колес), достаточным является измерение четырех параметров: давление турбонаддува; давление в шинах; частота вращения коленчатого вала двигателя; фактическая скорость движения агрегата (рисунок 63).

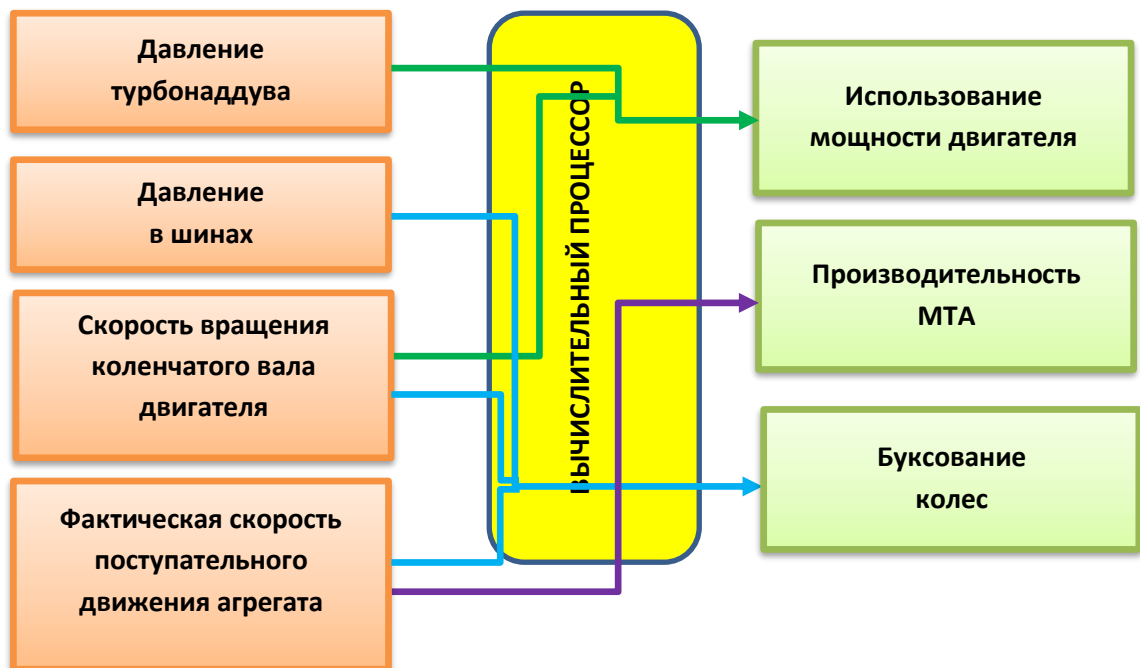


Рисунок 63 – Схема потока и обработки данных при определении основных целевых показателей работы МТА

Представленная на рисунке 63 схема, позволяет автоматизировать первый этап решения задачи выбора наиболее энергоэффективной конфигурации трактора и режима работы МТА (Рисунок 10) – «Определение текущих параметров работы МТА при выполнении сельскохозяйственной операции». Для реализации данной схемы необходимо наличие одного датчика для измерения давления турбонаддува, от 2-х до 8-и датчиков давления в шинах трактора (количество датчиков определятся колесной формулой трактора (4К2 или 4К4) и установкой одинарных или спаренных колес), одного датчика частоты вращения коленчатого вала двигателя и одночастотного ГНСС-приемника. Для обработки данных, полученных от первичных преобразователей и предоставления информации оператору МТА достаточно микроконтроллера с «жестко» заложенными алгоритмами и алфавитно-цифровым дисплеем для предоставления информации оператору.

Для реализации автоматического анализа результатов мониторинга текущих целевых показателей и предоставления оператору рекомендаций по изменению конфигурации трактора и режима работы МТА, в схему, представленную на рисунке 63, необходимо включить еще один процессор – аналитический, который будет отвечать за логическую обработку целевых показателей работы агрегата (сопоставление с потенциальными возможностями, заложенными в конструкцию трактора и решение задач оптимизации). Кроме того, для решения поставленных задач потребуется расширенная база данных, которая будет содержать необходимый набор информации для работы вычислительного и аналитического процессоров. Обеспечение двухстороннего интерфейса системы и оператора, позволит обеспечить возможность актуализации базы данных, ее адаптации для различных видов (типов, марок) сельскохозяйственных машин в состав МТА и различных условий выполнения сельскохозяйственных операций. Схема представлена на рисунке 64.



Рисунок 64 – Схема потока и обработки данных при определении оптимальной конфигурации трактора и режима работы МТА.

Реализация представленной схемы в значительно большей степени соответствует решению поставленной в исследовании задаче, однако обладает одним существенным недостатком. Существенной проблемой, влияющей на адекватность работы устройства по схеме, представленной на рисунке 63, является то, что опорные значения сопоставляемых параметров, могут довольно существенно отличаться для различных образцов однотипных машин в силу особенностей конструкции, технического состояния и т.п. Кроме того, для одной и той-же машины, опорные параметры могут изменяться с течением времени по причине изменения технического состояния и условий эксплуатации.

Для решения этой проблемы, в схему обработки данных следует ввести алгоритмы индуктивного самообучения, основанные на выявлении эмпирических закономерностей изменения параметров (скорость движения, давление наддува,

использование энергетического потенциала и т.д.) работы МТА в изменяющихся условиях. Кроме того, возможность внешнего пополнения и актуализации базы данных, позволяет использовать алгоритмы дедуктивного машинного обучения, основанные на формализации экспертных знаний, появляющихся в результате новых научных исследований (рисунок 65).

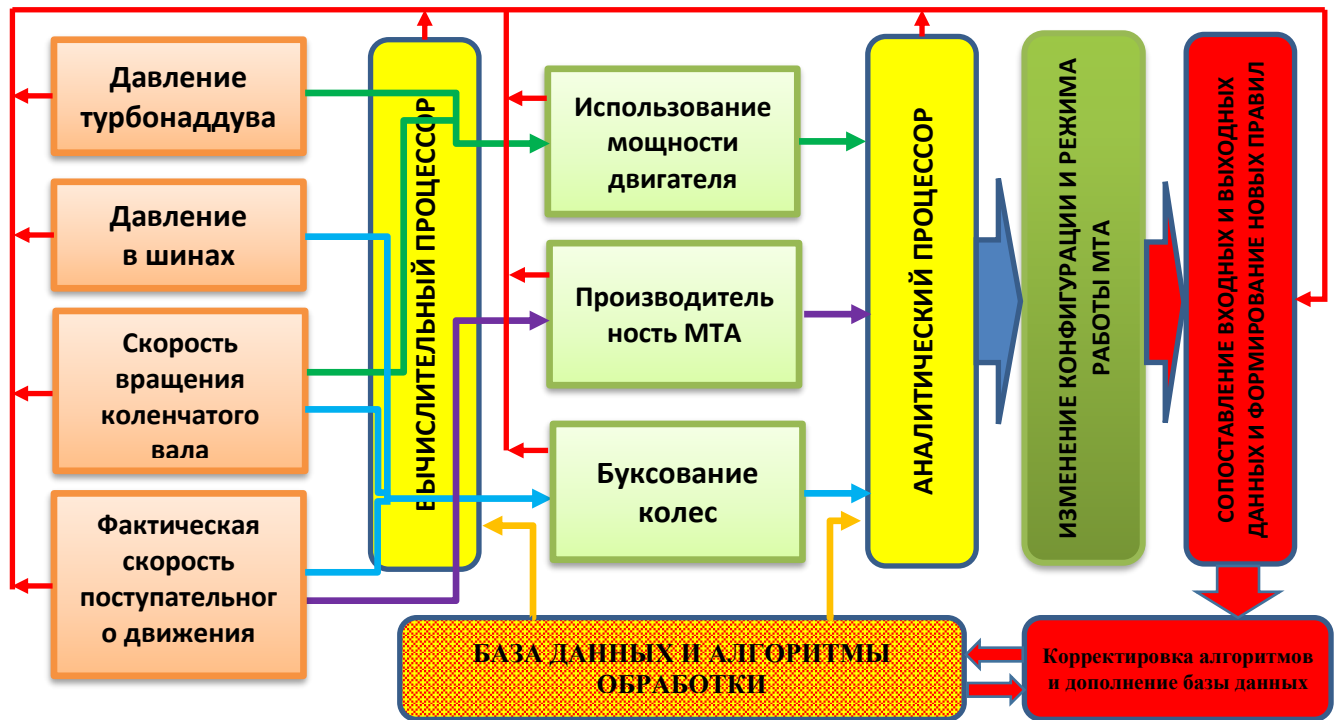


Рисунок 65 – Включение в схему потока и обработки данных алгоритмов машинного самообучения.

5.1.2 Структурная схема телеметрической системы для повышения энергоэффективности МТА

В результате проведенного исследования, для реализации разработанной концепции телеметрической системы повышения энергоэффективности МТА, для практической реализации была принята структурная схема телеметрического типа, представленная на рисунке 66.



Рисунок 66 – Структурная аппаратная схема телеметрической системы повышения энергоэффективности МТА.

Центральным элементом системы является носимый КПК (карманный персональный компьютер) – смартфон серийного производства с установленным специализированным программным обеспечением, который локально обрабатывает данные, поступающие от внешних источников и предоставляет результат обработки оператору. Базовая комплектация любого современного смартфона позволяет обеспечить широкие возможности двустороннего интерфейса с оператором. В качестве данных для обработки используется информация о физических параметрах работы агрегата, информация, полученная от оператора и информация, полученная из удаленных источников. Для обеспечения беспроводного интерфейса между первичными преобразователями и КПК, используется регистратор-трансмисмиттер. Его функцией является связь по радиоканалу диапазона 433 МГц с телеметрическими датчиками, последующая первичная обработка данных и обеспечение беспроводного интерфейса с PDA-устройством в диапазоне 2,4 ГГц по стандарту Wi-Fi. Диапазон 433 МГц

простирается от 433 до 447 МГц, и удобен тем, что если мощность передатчиков радиооборудования не превышает 10 милливатт, то конечному покупателю не требуется договариваться с радиочастотными службами о разрешениях и лицензиях. Помимо безлицензионности, диапазон 433 МГц привлекателен хорошим радиусом действия при наличии большого количества отражающих элементов и компактными размерами антенн. По сравнению с диапазоном 2,4 ГГц приемопередатчики диапазона 433 МГц представляют собой относительно простые беспроводные решения, которые могут десятилетиями работать от батарей, обеспечивая при этом устойчивую связь не только на открытом пространстве. Интерфейс между регистратором – трансмиттером и PDA-устройством оператора предъявляет уже более высокие требования к скорости передачи данных и устойчивости к помехам, кроме того, в современных устройствах уже имеется возможность передачи данных по стандартам Bluetooth и Wi-Fi диапазона 2,4 ГГц. Примерное соотношение скорости и дальности передачи данных различных стандартов представлено на рисунке 67.

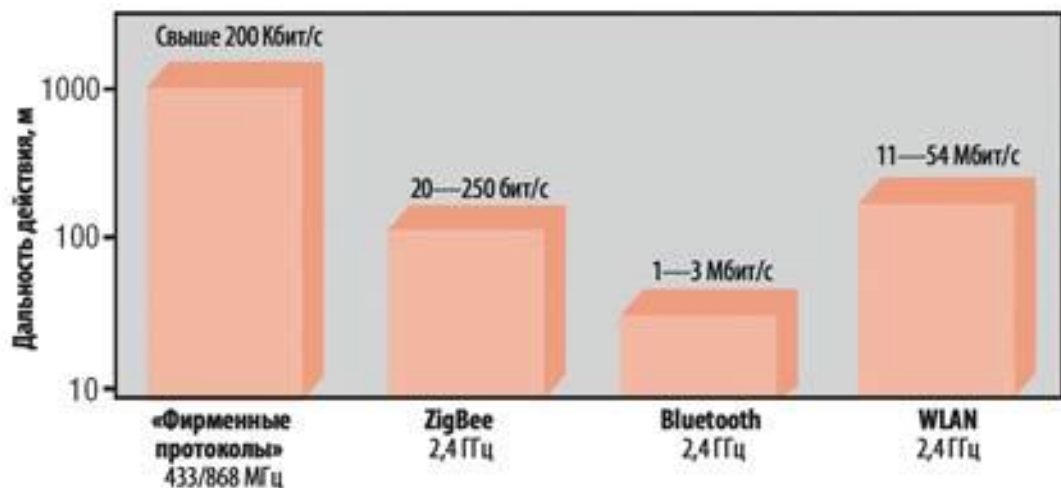


Рисунок 67 – Примерное соотношение дальности связи и скорости передачи данных для различных беспроводных стандартов.

Для получения информации о состоянии рабочего процесса используется комплект первичных преобразователей (датчиков), которые обеспечивают интерфейс между физическими параметрами работы МТА и регистрирующим устройством.

Предложенная структурная аппаратная схема позволяет решить следующие проблемы:

- проблему монтажа первичных преобразователей и прокладки сигнальной проводки от точек измерения сред и параметров до обрабатывающего устройства и оператора за счет использования телеметрии;
- проблему достаточности вычислительной мощности и обеспечения интерфейсов оператора, ввода и вывода данных за счет использования смартфона оператора и облачных вычислений;
- проблему сохранения, актуализации и синхронизации формируемой базы данных для анализа и расчетов.

5.1.3 Разработка экспериментального образца телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора»

Разработанная концепция и структурная схема была реализована в виде экспериментального образца аппаратно-программного комплекса «Персональный ассистент механизатора» (рисунок 68), состоящего из пяти телеметрических датчиков давления (позиция 1 на рисунке 68), регистрирующего блока-трансммиттера (позиция 2 на рисунке 68) и смартфона (позиция 3 на рисунке 68). Один датчик давления устанавливается на впускной коллектор двигателя трактора, а четыре остальных – измеряют давление в шинах ведущих колес трактора (при необходимости, например, в случае установки спаренных колес, количество датчиков может быть увеличено до восьми). С помощью кабеля, к регистратору-трансммиттеру подключается сигнал со штатного датчика скорости вращения коленчатого вала двигателя, либо сигнал с одной из невыпрямленных обмоток электрического генератора (клемма W). Дополнительно, имеется возможность подключения пьезоэлектрического датчика измерения скорости вращения коленчатого вала двигателя. Питание датчиков давления осуществляется с помощью съемных элементов, питание регистратора-трансммиттера – от бортовой электрической сети трактора. Во время работы,

регистратор-трансммиттер получает данные от датчиков давления по радиоканалу 433 МГц и датчика скорости вращения коленчатого вала двигателя по проводному интерфейсу, проводит их первичную обработку и по сети Wi-Fi передает на смартфон оператора.

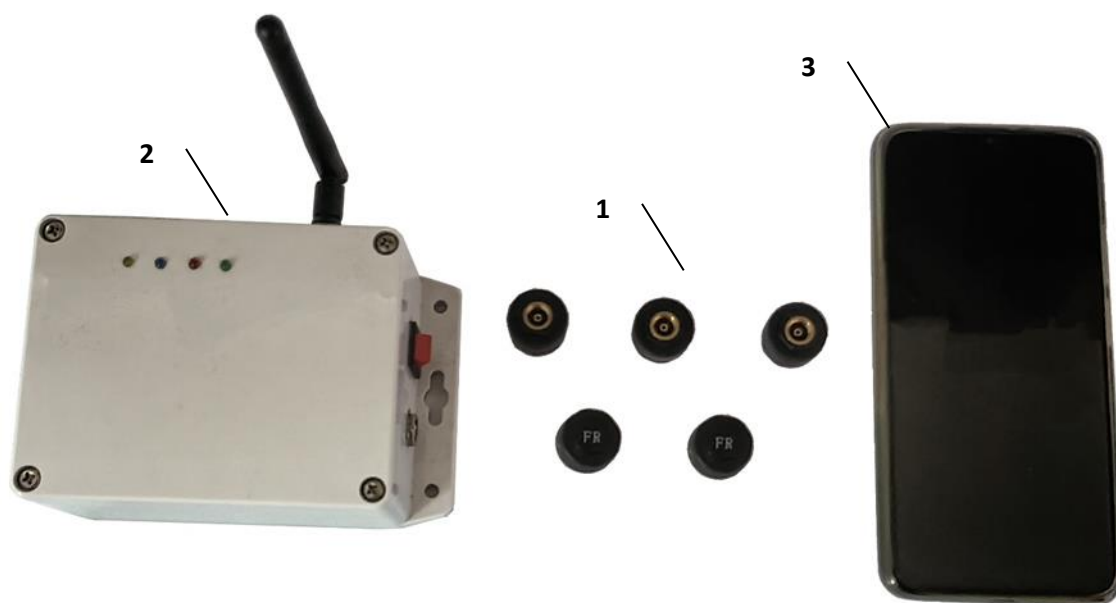


Рисунок 68 – Экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса
«Персональный ассистент механизатора»

Для измерения давлений используются автономные телеметрические датчики МУ5J фирмы Deelife. Основные технические характеристики представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Основные технические характеристики датчиков давления МУ5J

Параметр	Значение параметра
Модель	МУ5J
Диапазон измерения, кПа	0...800
Погрешность измерения, кПа	± 3
Рабочая температура, °C	-40...+95
Напряжение питания, В	5
Источник питания	съемная батарея
Материал датчика	Нейлоновое стекловолокно, медь
Степень защиты	IPX7
Габаритные размеры, мм:	
- высота	17
- диаметр	21
Масса, г	9

Для монтажа датчика МУ5J на патрубок магистрали турбонаддува двигателя трактора, был разработан специальный адаптер (рисунок 69).

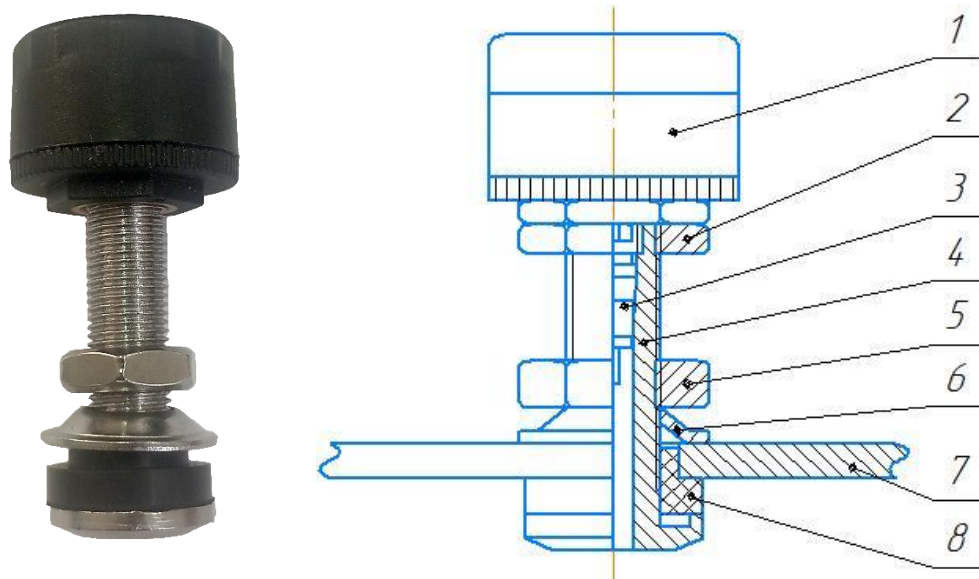


Рисунок 68 – Монтаж датчика МУ5J на магистраль турбонаддува двигателя.

Адаптер состоит из корпуса 4, уплотнительного кольца 8, прижимной шайбы 6 и гайки 5. Внутри корпуса адаптера вкручивается запорный штифтовой

клапан 3, который позволяет поддерживать герметичность магистрали, при необходимости демонтажа датчика 1.

Для монтажа адаптера, в стенке патрубка 7 необходимо просверлить отверстие диаметром 12 мм, затем, вставить изнутри патрубка адаптер с уплотнительным кольцом 8, установить прижимную шайбу 6 и закрепить адаптер в патрубке с помощью гайки 5. Контрирующая гайка 2 предназначена для предотвращения самоскручивания датчика во время работы.

Для сбора, первичной обработки и дальнейшей передачи данных от датчиков, был доработан блок-регистратор измерительной системы ИП-296 (рисунок 70) [170]. Блок содержит радиомодуль 433 МГц, модуль частотомер для измерения скорости вращения коленчатого вала, микропроцессор и радиомодуль Wi-Fi. Управление блоком-трансмисмиттером осуществляется с помощью встроенного программного обеспечения «ПАМ-трансмисмиттер» [91] (Приложение Б)

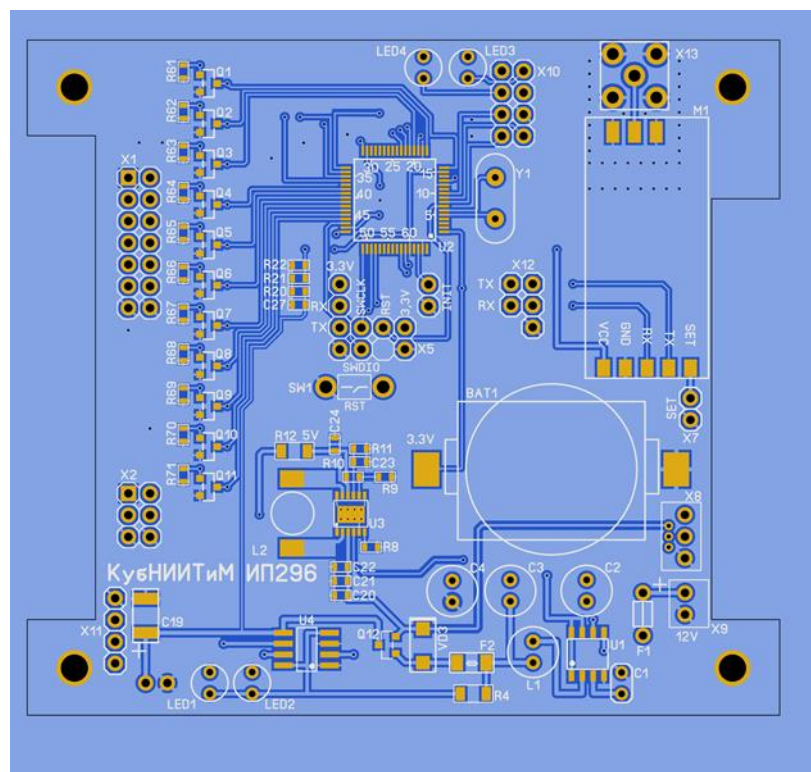


Рисунок 70 – Доработанная печатная плата измерительной системы ИП-296

Фактическая скорость движения, определяется с помощью GPS-приемника смартфона пользователя.

Для управления работой системы разработано программное обеспечение «Умный помощник тракториста» [92] (Приложение А) (рисунок 71).

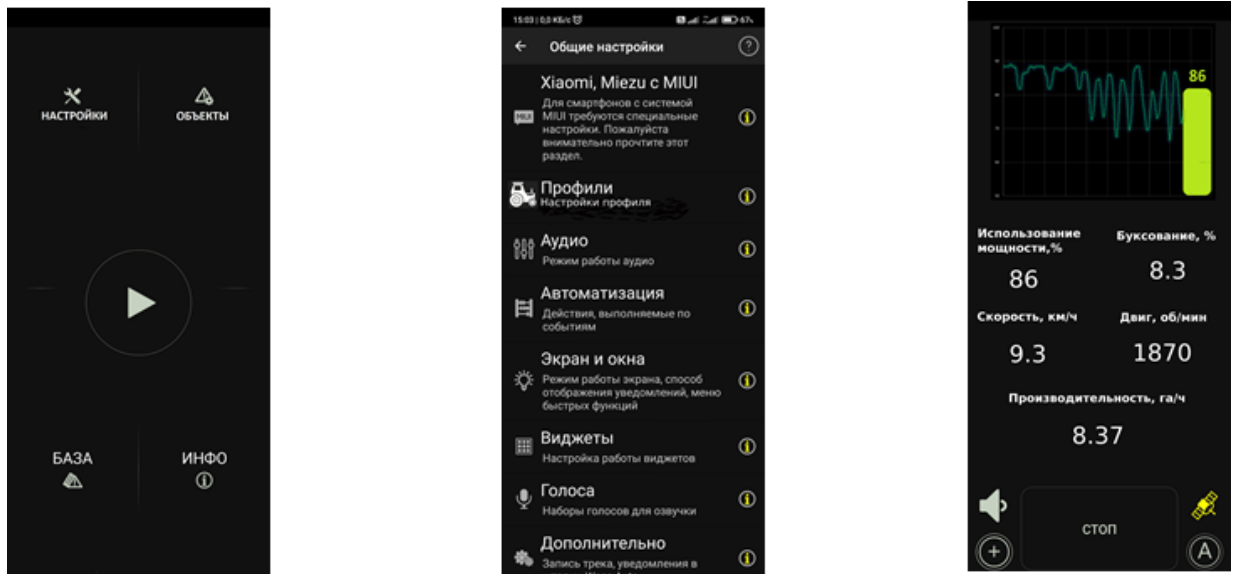


Рисунок 71 – ПО «Умный помощник тракториста»

Для работы системы, после монтажа всех входящих в нее элементов на трактор, пользователю необходимо выполнить ряд обязательных настроек и калибровок. На первом этапе следует указать марку трактора. На текущий момент, встроенная база данных содержит более 300 моделей тракторов наиболее известных производителей. При наличии модели трактора пользователя в базе, все необходимые для работы системы данные выбираются из базы автоматически, тем не менее, пользователь имеет возможность принять их для работы, либо указать самостоятельно (в этом случае данные, полученные от пользователя, после проверки могут быть использованы для актуализации имеющейся базы). В случае отсутствия модели трактора пользователя в базе данных, ему будет предложено в диалоговом режиме внести необходимую информацию (минимально-достаточное для работы количество информации можно получить из руководства по эксплуатации трактора).

На следующем этапе, пользователю следует указать информацию, характерную для данного конкретного трактора (масса, количество и расположение балластных грузов, параметры и марка шин, количество колес на каждой оси). После внесения всей необходимой информации пользователем, система предложит выполнить ряд калибровок измерительных датчиков. Все калибровки выполняются в полуавтоматическом диалоговом режиме, система предлагает пользователю выполнить ряд действий при определенных условиях, на основе интеллектуальных алгоритмов определяет точность следования предлагаемым инструкциям, набирает необходимое количество измерений и рассчитывает калибровочные коэффициенты.

Для более корректной работы системы необходимо также настроить профили машинно-тракторного агрегата. Для этого необходимо внести в настройки системы параметры сельскохозяйственных орудий, с которыми будет работать трактор. В первую очередь указывается тип орудия, его марка, ширина захвата, способ соединения с трактором (навеска на 1, 2 или 3 точки, тяговый крюк). Как и в случае с настройками трактора, информация о ряде сельскохозяйственных орудий содержится в пополняемой базе данных.

После выполнения всех необходимых настроек и калибровок система готова к работе. При каждом включении, система определяет наличие подключенных датчиков, наличие необходимой информации о тракторе и наличие калибровочных данных. После этого система предлагает пользователю настроить профиль машинно-тракторного агрегата (выбрать из имеющихся или, при необходимости, добавить новый) и указать планируемый вид работ.

Во время работы, система автоматически определяет, степень загрузки двигателя [36, 76, 140], ступень трансмиссии трактора, буксование колес, фактическую скорость движения, производительность выполнения работ [36, 139, 141]. Кроме того, по мере набора данных, полученных во время эксплуатации, система может автоматически определять границы полей пользователя, их макрорельефные параметры, строить карту твердости почвы (под картой

твердости почвы в данном случае следует понимать энергетический аспект, то есть сопротивляемость почвы обработке).

На основании этих данных, система определяет потенциальную возможность повышения энергоэффективности выполняемой операции, например, возможность повышения производительности или снижения затрат топлива за счет перехода на более эффективный режим работы двигателя. При наличии такой возможности, система информирует пользователя о доступности более эффективных настроек работы агрегата и предлагает предпринять ряд мер (изменить ступень трансмиссии, ограничить или увеличить скорость вращения коленчатого вала двигателя, изменить балластировку или давление в шинах трактора).

5.1.4 Экспериментальная проверка телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора»

Проверка работоспособности экспериментального образца телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора» проводилась на полях валидационного полигона Новокубанского филиала ФГБНУ «Росинформагротех» при посеве озимой пшеницы сеялкой John Deere 455 в агрегате с трактором John Deere 8420 (рисунок 72).



Рисунок 72 – Зерновая сеялка John Deere 455 в агрегате с трактором John Deere 8420 на посеве озимой пшеницы

Оценка работоспособности устройства проводилась методом сравнения эксплуатационно-технологических показателей работы агрегата при выполнении сельскохозяйственной операции на базовом режиме в текущей конфигурации трактора и на режимах, рекомендованных устройством. Для проведения сравнительной оценки, после установки на трактор устройства (рисунки 73, 74, 75) и проведения необходимых настроек и калибровок, агрегат был запущен в работу на обычном режиме на 10-й ступени трансмиссии. Эксплуатационно-технологические показатели работы агрегата на этом режиме представлены в таблице 13. Параметры работы агрегата, полученные устройством «Персональный ассистент механизатора» и используемые для определения энергоэффективности конфигурации и режима работы, приведены в таблице 14.



Рисунок 73 – Установка регистратора-трансммиттера на трактор John Deere 8420



Рисунок 74 – Установка датчика давления наддува на трактор John Deere 8420

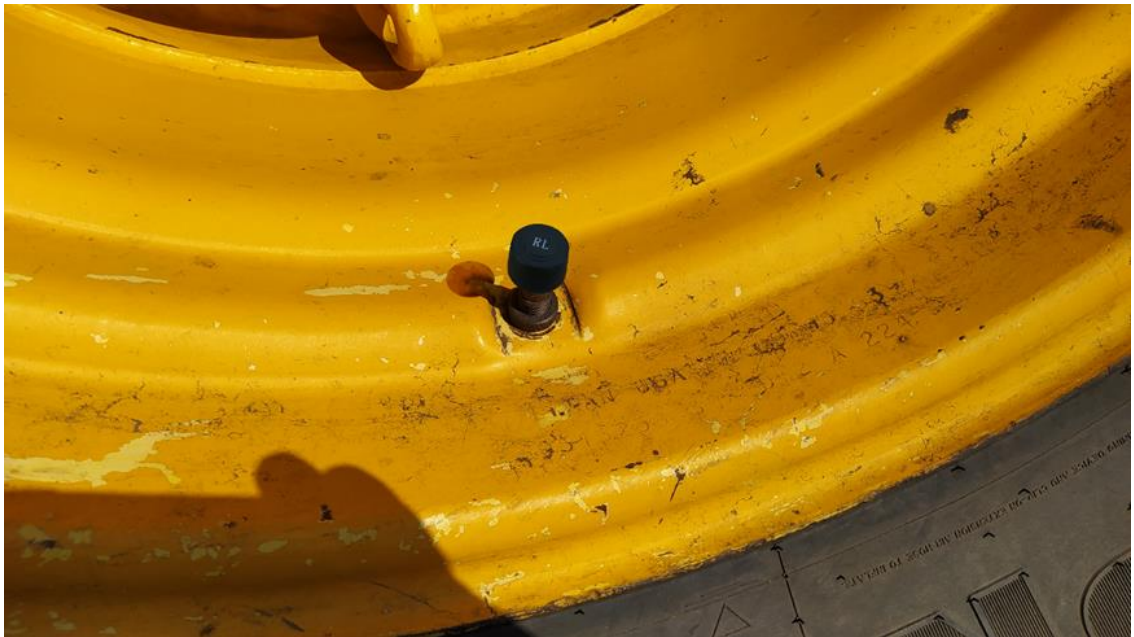


Рисунок 75 – Установка датчиков давления в шинах на трактор John Deere 8420

Таблица 13 – Результаты ЭТО при работе агрегата на базовом режиме

Показатель	Значение показателя:
Состав агрегата	трактор + сеялка
Марка агрегата	John Deere 8420 + John Deere 455
Период проведения оценки	Октябрь 2022
Место проведения оценки	КубНИИТиМ
Культура	Озимая пшеница
Технологическая операция	Посев озимой пшеницы
Режим работы:	
- скорость движения, км/ч	9,438
- рабочая ширина захвата, м	10,6
Производительность за 1 ч времени, га/ч:	
- основного	10,004
- технологического	5,521
- сменного	4,921
Удельный расход топлива за 1 ч сменного времени, кг/га	3,216
Удельные энергозатраты, МДж/га	138,674
Эксплуатационно-технологические коэффициенты:	
- рабочих ходов	0,851
- технологического обслуживания	0,691
- надежности технологического процесса	1
- использования технологического времени	0,585
- использования сменного времени	0,492
Число обслуживающего персонала	1

Таблица 14 – Основные параметры работы агрегата, определенные устройством «Персональный ассистент механизатора» на базовом режиме

Параметр	Значение параметра:	Возможность оптимизации параметра
Состав агрегата*	трактор + сеялка	-
Марка трактора*	John Deere 8420	-
Масса балластных грузов, кг*	1900	Есть
Давление в шинах, кПа	105	Есть**
Марка орудия	John Deere 455	-
Рабочая ширина захвата, м*	10,6	-
Технологическая операция*	Посев озимой пшеницы	-
Период проведения оценки	Октябрь 2022	-
Основная ступень трансмиссии	10	Есть
Обороты двигателя, об/мин	2220...2260	Есть
Использование мощности двигателя, %	40...55	Есть
Фактическая скорость, км/ч	9,6	Есть
Буксование колес, %	3...5	Есть
Производительность, га/ч:	11,448	Есть
* Значения этих параметров вводятся оператором при настройке устройства на текущий вид работы.		
** - При изменении параметров баллаستировки		

Во время определения эксплуатационно-технологических показателей работы, на основании мониторинга текущих параметров работы агрегата, системой были рассчитаны рекомендации по изменению конфигурации трактора и режима работы МТА в двух направлениях повышения энергоэффективности: повышение производительности (вариант 1) и повышение топливной экономичности (вариант 2). Рекомендуемые для установки параметры представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Рекомендации по изменению конфигурации трактора и режима работы агрегата, рассчитанные устройством

Параметр	Рекомендованное значение для:	
	Повышения производительности	Повышения топливной экономичности
Масса балластных грузов, кг	0	0
Давление в шинах, кПа	90	90
Основная ступень трансмиссии	12	11
Обороты двигателя, об/мин	2000	1600

После того как проверка работы на рекомендованных режимах показала устойчивое выполнение технологического процесса, были определены эксплуатационно-технологические показатели на каждом из них. Эксплуатационно-технологическая оценка проводилась на поле 1(1) валидационного полигона КубНИИТиМ. Одна половина поля была засеяна на режиме повышенной производительности, вторая половина – на режиме повышенной топливной экономичности. Диаграмма скорости движения агрегата представлена на рисунке 76. Результаты эксплуатационно-технологической оценки представлены в таблице 16.

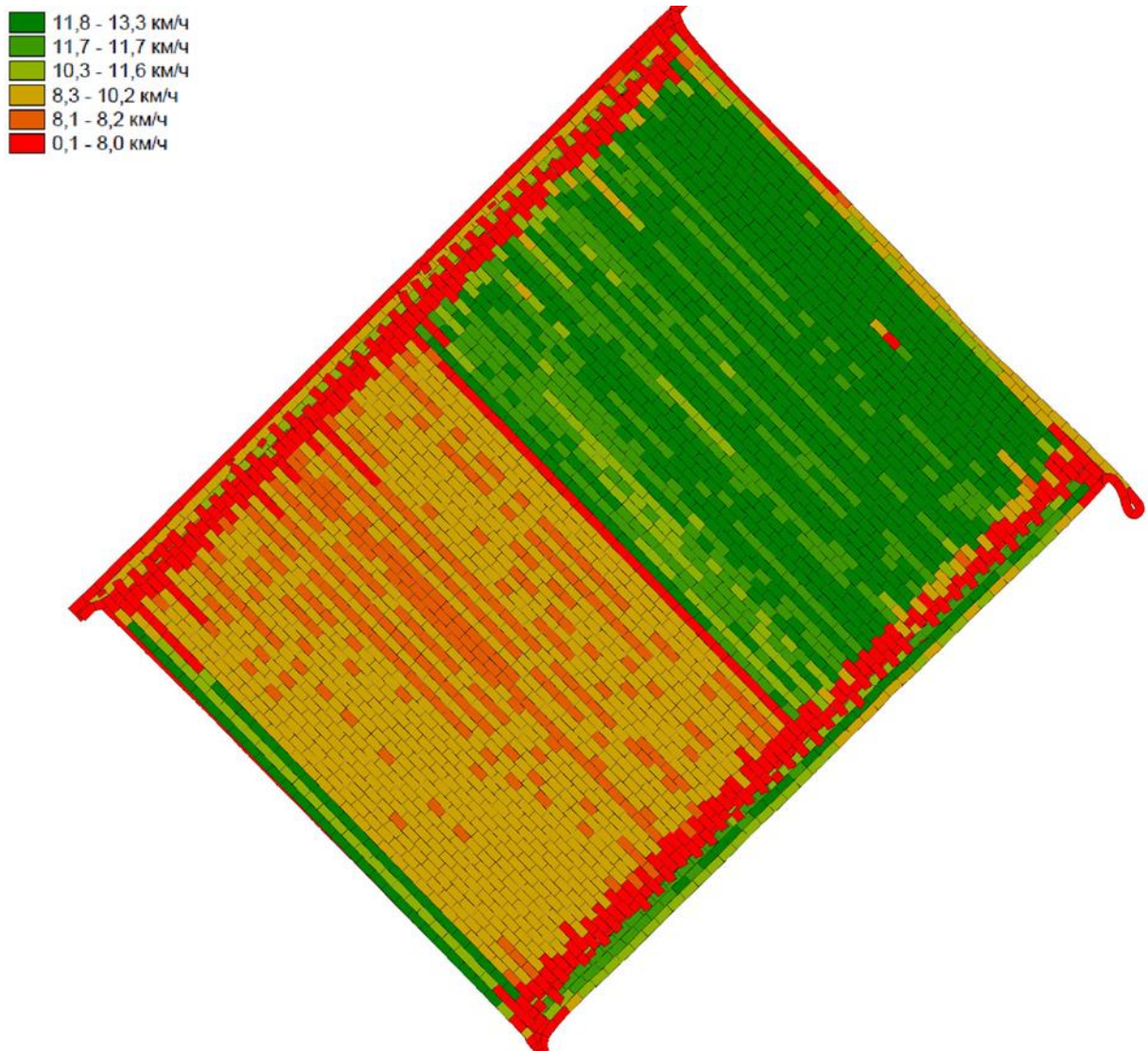


Рисунок 76 – Диаграмма скорости движения агрегата John Deere 8420 + John Deere 455 при посеве озимой пшеницы на альтернативных режимах

По результатам эксплуатационно-технологической оценки работы агрегата видно, что оба варианта изменения режима работы, рекомендованные устройством, привели к повышению энергоэффективности выполнения операции сева озимой пшеницы агрегатом John Deere 8420 + John Deere 455. В варианте-1, производительность основного времени увеличилась на 16 % по сравнению с базовым режимом и составила 11,621 га/ч. Удельные энергозатраты при этом снизились на 12 % и составили 122,720 МДж/га за сменное время. При настройке режима работы в соответствии с вариантом 2 рекомендаций, при сохранении базовой скорости движения и производительности (10,304 га/ч основного времени в альтернативном варианте и 10,004 га/ч в базовом варианте), удельные

энергозатраты снизились на 14 % по сравнению с базовым вариантом и составили 119,615 МДж/га.

Таблица 16 – Результаты ЭТО при работе агрегата на альтернативных режимах

Показатель	Значение показателя:	
	Вариант 1	Вариант 2
Состав агрегата	трактор + сеялка	
Марка агрегата	John Deere 8420 + John Deere 455	
Период проведения оценки	Октябрь 2022	
Место проведения оценки	КубНИИТиМ	
Культура	Озимая пшеница	
Технологическая операция	Посев озимой пшеницы	
Режим работы:		
- скорость движения, км/ч	12,852	9,721
- рабочая ширина захвата, м	10,6	10,6
Производительность за 1 ч времени, га/ч:		
- основного	11,621	10,304
- технологического	6,821	6,048
- сменного	5,787	5,080
Удельный расход топлива за сменное время, кг/га	2,846	2,774
Удельные энергозатраты, МДж/га	122,720	119,615
Эксплуатационно-технологические коэффициенты:		
- рабочих ходов	0,851	0,851
- технологического обслуживания	0,691	0,692
- надежности технологического процесса	1	1
- использования технологического времени	0,587	0,587
- использования сменного времени	0,498	0,493
Число обслуживающего персонала	1	1

5.2 Рекомендации по применению разработанных методов и телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора»

5.2.1 Рекомендации по применению метода инструментального контроля степени использования мощности двигателя

Разработанные методики инструментального контроля степени использования мощности двигателя, скорости движения и буксования колес трактора, по причине доступности, высокой точности, информативности и возможности определения как мгновенных, так и усредненных за опыт значений, могут найти широкое применение при проведении исследований и испытаний сельскохозяйственных машин и тракторов.

Методика инструментального контроля степени использования мощности двигателя позволяет полностью заменить метод определения энергетических показателей по расходу топлива в соответствии с ГОСТ Р 52777-2007 и ГОСТ 34631-2019 «Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки»

Обе методики могут использоваться в дополнение к частным методикам определения конкретных показателей по ГОСТ 30745-2001 «Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей».

Обе методики могут применяться как вспомогательные, при определении неэнергетических показателей, частные готовые методики определения которых требуют конкретного нагрузочного и скоростного режима работы испытываемого трактора или машины. Например, при определении шума и вибрации по ГОСТ 12.2.002-91 «Техника сельскохозяйственная. Методы оценки безопасности», при определении максимальных нормальных напряжений в почве по ГОСТ Р 58656-2019 «Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву» и других.

Обе методики могут использоваться в развитие методов и технических средств эксплуатационно-технологической оценки сельскохозяйственных машин.

5.2.2 Рекомендации по применению телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора»

Концепция и структурная схема устройства «Персональный ассистент механизатора» разрабатывались таким образом, чтобы максимально упростить установку и эксплуатацию потребителем. Тем не менее, существует ряд рекомендаций, следование которым, обеспечит максимально корректную, безопасную и долгую работу устройства.

Наиболее сложным и ответственным этапом является установка на патрубок впускной магистрали двигателя адаптера для установки датчика давления (рисунок 69). Для места установки датчика, рекомендуется выбирать прямолинейный участок (без уменьшения или увеличения диаметра проходного сечения), длина которого составляет не менее трех диаметров. После выбора места установки, следует подготовить отверстие для монтажа адаптера. Некачественно выполненный монтаж адаптера может оказать критическое влияние на работу как устройства, так и двигателя, и может привести к выходу их из строя. Поэтому в комплект устройства включены инструменты, обеспечивающие необходимое качество монтажа (рисунок 77)



1 – сверло по металлу, конусное 3-14 мм; 2 – шарошка абразивная, шарообразная, Ø 25 мм

Рисунок 77 – Инструменты для монтажа датчика давления наддува, входящие в комплект устройства «Персональный ассистент механизатора»

Этапы подготовки отверстия для монтажа адаптера датчика давления наддува, представлены на рисунке 78. После выбора места установки датчика, следует демонтировать патрубок с двигателя трактора (место для установки адаптера рекомендуется предварительно отметить, чтобы после сборки был обеспечен легкий и безопасный доступ к датчику) и, с помощью ручной дрели, выполнить сверление отверстия в стенке патрубка конусным сверлом, входящим в комплект устройства (рисунок 78) до отметки 11 мм (позиция 1 на рисунке 78). Далее, следует удалить оставшиеся после сверления неровности и заусенцы с помощью абразивной шарообразной шарошки, как показано на позициях 2 и 3 рисунка 78. После окончательной доработки отверстия, следует установить адаптер датчика давления наддува, очистить внутреннюю поверхность патрубка от пыли, опилок и мусора и установить патрубок на двигатель.

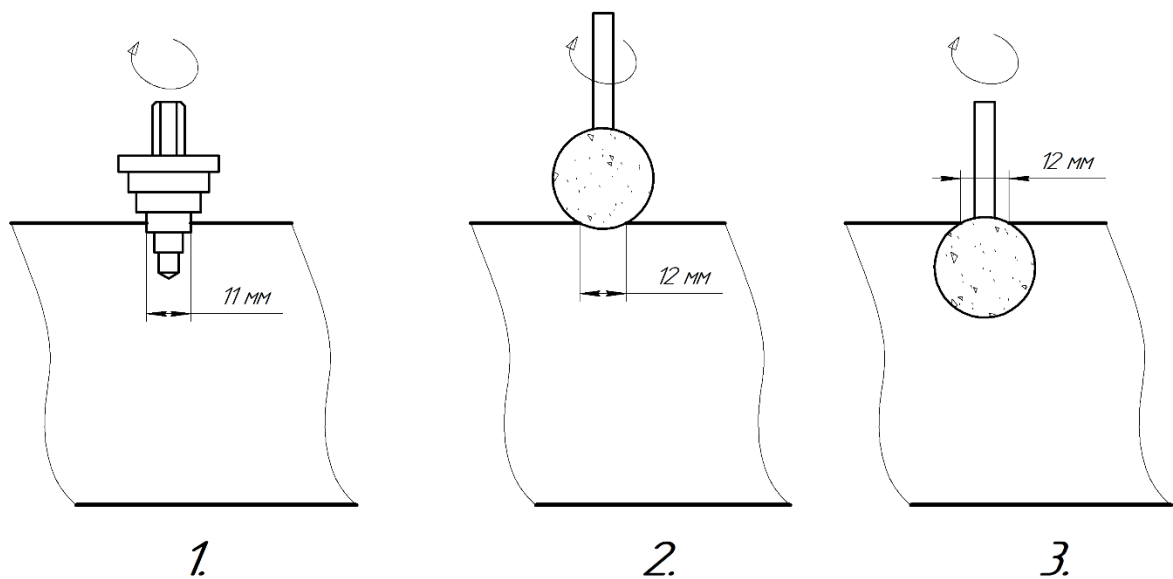


Рисунок 78 – Подготовка отверстия для установки адаптера датчика давления в патрубке впускной магистрали

Вторым моментом, который может вызвать затруднения при монтаже устройства «Персональный ассистент механизатора», может являться подключение блока-трансммиттера к датчику частоты вращения коленчатого вала двигателя. Как минимум один такой датчик имеется на каждом современном двигателе. В основном используются трехпроводные и четырехпроводные

electroandi.ru



electroandi.ru

electroandi.ru

напряжение – это датчик типа PNP. Если на мультиметре при активном датчике напряжения нет, скорее всего, это датчик типа NPN.

Для возможности быстрого и надежного подключения блока-трансммиттера к штатным датчикам частоты вращения коленчатого вала двигателя, в комплект устройства «Персональный ассистент механизатора» включены два прокалывающих кабельных ответвителя 0,5-1,0 мм² (рисунок 80)

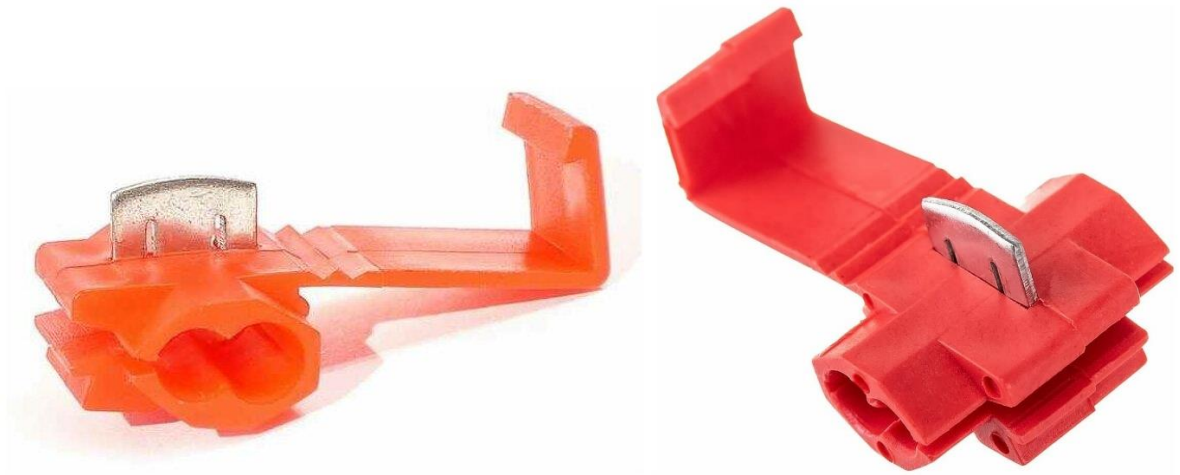


Рисунок 80 – Прокалывающий кабельный ответвитель 0,5-1,0 мм²

5.3 Оценка экономической эффективности результатов исследований

Экономическая эффективность внедрения разработанной телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора» заключается в снижении эксплуатационных затрат при выполнении механизированных сельскохозяйственных операций. Такое снижение происходит в следствие выбора режима работы агрегата, позволяющего наиболее полно и эффективно использовать энергетический потенциал и тягово-сцепные свойства трактора, что, в свою очередь, позволяет повысить производительность и (или) топливную экономичность выполняемой сельскохозяйственной операции.

Для технико-экономического обоснования внедрения разработки требуется:

- определить стоимость телеметрической системы и первичных преобразователей;

- определить показатели экономической оценки при выполнении технологических сельскохозяйственных операций на базовых режимах работы МТА и на режимах, рекомендованных телеметрической системой «Персональный ассистент механизатора»;

- определить показатели экономической эффективности применения телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора»

При расчете экономической эффективности принимались имеющиеся значения тарифных ставок и стоимость дизельного топлива. Обоснование проводилось в соответствии с методиками [6, 96, 105, 120, 122].

5.3.1 Определение затрат на изготовление измерительной информационной системы

Для определения величины капитальных вложений необходимо подсчитать полную стоимость разработанного экспериментального образца телеметрической системы, включая первичные преобразователи. Расчёт делается по формуле (66)

$$C_H = O_H + M_H + \frac{O_H \cdot HP}{100}, \quad (66)$$

где O_H – величина оплаты труда производственного персонала, руб.;

M_H – стоимость материалов и деталей, руб.;

HP – накладные расходы, %.

Затраты денежных средств на оплату труда производственного персонала складываются из оплаты труда профильных специалистов, занятых при изготовлении компонентов телеметрической системы, первичных преобразователей, и рассчитываются по формуле (67)

$$O_H = \sum_{k=1}^n \lambda_k \tau_k K_3, \quad (67)$$

где n – количество квалификаций задействованного в производстве персонала, человек;

λ_k – численность производственного персонала k -й квалификации, человек;

τ_k – часовая оплата труда производственного персонала k -й квалификации, руб/чел.-ч;

K_3 – коэффициент, учитывающий уровень социальных отчислений от зарплаты, $K_3 = 1,32$.

Расчёт заработной платы при производстве компонентов телеметрической системы приведен в таблице 17.

Таблица 17 – Трудоёмкость и заработная плата специалистов при производстве компонентов телеметрической системы

Устройство, компонент	Радиомонтажник, ставка 120 руб/ч		Слесарь-наладчик КИПиА, ставка 150 руб/ч		Начисленная заработная плата, руб.
	затраты труда, чел.-ч	заработная плата, руб.	затраты труда, чел.-ч	заработная плата, руб.	
Регистратор- трансмиситтер	8	1267,2	8	1584	2851,2
Итого, руб.					2851,2

Стоимость приобретённых материалов и деталей каждого компонента телеметрической системы приведена в таблице 18.

Таблица 18 – Стоимость материалов и деталей

Наименование	Количество	Цена единицы, руб.	Сумма, руб.
Регистратор-трансммиттер			
Модуль беспроводной связи ИП-296	1	3550	3550
Wi-Fi модуль ESP-03	1	1080	1080
Электронные компоненты	-	200	200
Итого, руб.			4830
Покупные первичные преобразователи			
Датчик давления МУ5J	5	680	3400
Прочие покупные компоненты			
Вентиль AutoParts 5029	1	60	60
Сверло по металлу конусное 3-14 мм	1	270	270
Шарошка абразивная шарообразная 25 мм	1	60	60
Кабельный ответвитель прокалывающий 0,5-1,0 мм ²	2	10	20
Итого, руб.			410

Экспериментальный образец телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора» практически полностью состоит из покупных компонентов, не требующих какой-либо доработки. Исключение составляет необходимость доработки модуля беспроводной связи ИП-295 производства КубНИИТиМ, соответственно величина заработной платы на изготовление составит (таблица 17)

$$O_H = 2851,2 \text{ руб.}$$

Стоимость покупных материалов и деталей и датчиков вместе с комплектом инструментов для установки составила:

$$M_H = 4830 + 3400 + 410 = 8640 \text{ руб.}$$

С учётом накладных расходов 250% от суммы начисленной заработной платы, полная стоимость экспериментального образца телеметрической системы:

$$C_H = 2851,2 + 8640 + \frac{2851,2 \cdot 250}{100} = 18619,2 \text{ руб.}$$

В расчёте стоимости системы не учитывается стоимость КПК (смартфона), поскольку концепция разработки предполагает использование устройства потребителя. Системные требования программного обеспечения «Умный помощник тракториста» позволяют использовать его на смартфонах под управлением системы Android начиная с версии 6.0. Смартфоны под управлением данной версии ОС Android начали выпускаться в 2015 году, что, с учетом среднего срока пользования смартфоном в России около двух лет [66], дает основание предполагать возможность ее работы практически на всех смартфонах под управлением Android в России.

5.3.2 Технико-экономический анализ

Экономический эффект от внедрения телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора» вытекает из разницы эксплуатационных затрат денежных средств при выполнении технологической сельскохозяйственной операции на базовом и альтернативном (рекомендованном устройством) режимах работы МТА.

Для расчета показателей экономической оценки использовались данные, полученные при определении эксплуатационно-технологических показателей работы агрегата Versatile 2375 + Challenger Sunflower 1435-29 на лущении пожнивных остатков (таблица 10) и агрегата John Deere 8420 + John Deere 455 на посеве озимой пшеницы (таблицы 13 и 16).

При проведении расчетов, цена сельскохозяйственной техники была принята на уровне балансовой стоимости по данным бухгалтерского учета

КубНИИТиМ и составила 10 036,92 тыс. руб. для агрегата Versatile 2375 + Challenger Sunflower 1435-29 и 8 112, 90 тыс. руб. для агрегата John Deere 8420 + John Deere 455.

Размер дополнительных капитальных вложений при использовании устройства «Персональный ассистент механизатора» составил 21,019 тыс. руб. и складывался из стоимости экспериментального образца и затрат на оплату 4-х часов работы механизатора, необходимых для установки и настройки системы на трактор.

Показатели экономической оценки применения телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора» на лушении пожнивных остатков и на посеве озимой пшеницы представлены в таблицах 19 и 21 соответственно. Показатели экономической эффективности применения телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора» на лушении пожнивных остатков и на посеве озимой пшеницы представлены в таблицах 20 и 22 соответственно.

Таблица 19 – Показатели экономической оценки применения системы «Персональный ассистент механизатора» на лушении пожнивных остатков (13 дней, 10 часов в день)

Показатели	Значение	
	база	альтернатива
Исходные данные для проведения расчетов по экономической оценке		
Состав агрегата	Versatile 2375+ Challenger Sunflower 1435-29	Versatile 2375+ Challenger Sunflower 1435-29+ система «ПАМ»
Производительность за 1 ч времени, га/ч:		
основного	9,3	9,4
сменного	7,5	7,5
Коэффициент:		
использования сменного времени	0,81	0,80
готовности	1,00	1,00
Расход топлива, кг/га	5,7	5,0
Показатели экономической оценки (на 1000 га)		
Затраты труда, чел.-ч	133	133
Потребность:		
в МТА, шт.	1	1
механизаторах, чел.	1	1
топливе, т	5,7	5,0
капитальных вложениях, тыс. руб.	10 036,92	10 057,94
Эксплуатационные затраты денежных средств, тыс. руб.	802,37	764,3

Таблица 20 – Показатели экономической эффективности применения системы «Персональный ассистент механизатора» на лушении пожнивных остатков

Показатель	Значение
Снижение потребности в топливе, т	0,7
Дополнительные капитальные вложения, тыс. руб.	21,019
Экономия эксплуатационных затрат денежных средств, тыс. руб.	38,07
Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений, лет	0,55

Таблица 21 – Показатели экономической оценки применения системы «Персональный ассистент механизатора» на посеве озимой пшеницы (15 дней, 14 часов в день)

Показатели	Значение		
	база	альтернатива	
		вариант 1	вариант 2
Исходные данные для проведения расчетов по экономической оценке			
Состав агрегата	John Deere 8420+ John Deere 455	John Deere 8420+ John Deere 455+ прибор	
Производительность за 1 ч времени, га/ч:			
основного	10,004	11,621	10,303
сменного	4,921	5,787	5,080
Коэффициент:			
использования сменного времени	0,49	0,50	0,49
готовности	1,00	1,00	1,00
Расход топлива, кг/га	3,216	2,846	2,774
Показатели экономической оценки (на 1000 га)			
Затраты труда, чел.-ч	203	172	196
Потребность:			
в МТА, шт.	1	1	1
механизаторах, чел.	1	1	1
топливе, т	3,216	2,846	2,774
капитальных вложениях, тыс. руб.	8 112,9	8 133,94	8 133,94
Эксплуатационные затраты денежных средств, тыс. руб.	1 896,91	1 610,15	1 821,16

Таблица 22 – Показатели экономической эффективности применения системы «Персональный ассистент механизатора» на посеве озимой пшеницы

Показатели	Значение	
	вариант 1	вариант 2
Снижение затрат труда, чел.-ч	31	7
Снижение потребности в топливе, т	0,370	0,442
Дополнительные капитальные вложения, тыс. руб.	21,019	
Экономия эксплуатационных затрат денежных средств, тыс. руб.	286,76	75,75
Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений, лет	0,07	0,28

5.4 Выводы по главе

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований методов инструментального контроля степени использования мощности двигателя, скорости движения и буксования колес трактора, а также алгоритмов расчета и выбора оптимального режима работы МТА и конфигурации трактора, реализованы в виде экспериментального образца телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора».

2. Модульная телеметрическая структурная схема, реализованная в виде экспериментального образца аппаратно-программного комплекса «Персональный ассистент механизатора», обеспечивает удобство для пользователя, универсальность и надежность в эксплуатации. Высокий потенциал усовершенствования и расширения функциональности комплекса может быть реализован лишь за счет внесения изменений в программное обеспечение и не требует внесения изменений в аппаратную составляющую.

3. Включение в схему обработки данных алгоритмов самообучения, основанных на выявлении эмпирических закономерностей изменения параметров работы МТА, существенно расширяет возможности применения телеметрической системы для повышения энергоэффективности работы машинно-тракторных агрегатов.

4. Проведенный экономический анализ показал, что применение разработанной телеметрической системы повышения энергоэффективности эксплуатации машинно-тракторных агрегатов является экономически целесообразным. Годовая экономия эксплуатационных затрат денежных средств для разных видов сельскохозяйственных операций составила от 38,07 до 286, 76 тыс. руб.

5. Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений составляет от 0,07 до 0,55 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ методов и средств контроля и оптимизации использования мощности трактора показал, что наиболее эффективными и доступными инструментами рационального и информативного оптимизирования потенциала и технических возможностей сельскохозяйственных тракторов со ступенчатыми трансмиссиями и низкой степенью автоматизации являются:

оптимизация частоты вращения коленчатого вала двигателя и передаточного отношения – обеспечивает снижение расхода топлива до 25% при сохранении производительности и качества технологического процесса;

изменение и перераспределение сцепного веса балластными грузами и регулировка давления в шинах – позволяют оптимизировать тягово-сцепные свойства трактора, способствуют экономии топлива до 15 % и снижению негативного воздействия движителей на почву.

2. Наиболее широко применимые при испытаниях и исследованиях способы, средства и методы инструментального контроля энергетических параметров работы МТА: тензометрирование, буксирование и метод расхода топлива. В условиях производственной эксплуатации все они имеют критические недостатки: сложность монтажа и настройки первичных преобразователей, необходимость существенного вмешательства в элементы конструкции трактора, наличия специализированного оборудования и высококвалифицированного персонала, низкая универсальность, обусловленная зависимостью элементов конструкции устройства от различий в конструкции тракторов, высокая стоимость.

3. Разработан метод определения степени использования мощности двигателя по измерению газотурбинного наддува, погрешность которого не превышает $\pm 1,4$ %, что позволяет определять усредненные и мгновенные значения, не требует значительного вмешательства в конструкцию двигателя,

сложного и дорогостоящего оборудования, высокой квалификации обслуживающего персонала.

4. Разработан метод определения скорости движения и буксования движителей трактора, основанный на прямом Допплеровском измерении фактической скорости движения МТА с помощью приемника глобальных навигационных спутниковых систем. Метод обеспечивает погрешность измерения фактической скорости $\pm 2 \%$ и точность измерения буксования $\pm 1,8 \%$, исключает необходимость использования датчиков вращения ведущих колес трактора и путеизмерителей для инструментального контроля буксования в производственных условиях.

5. Экспериментально установлено, что относительное отклонение коэффициента степени использования мощности двигателя, скорости движения и буксования, определенных по разработанным методам, от показателей, определенных стандартными методами, не превышает соответственно 1,86, 1,30 и 1,51 %, что подтверждает работоспособность и точность разработанных методик.

6. Оценку основных целевых показателей работы трактора со ступенчатой трансмиссией в производственных условиях целесообразно проводить по четырем параметрам: давление газотурбинного наддува, давление в шинах, частота вращения коленчатого вала двигателя, фактическая скорость движения.

7. На основе мониторинга целевых показателей с помощью предлагаемых методов, обоснованы технические и метрологические требования к разработке телеметрической системы повышения энергоэффективности МТА при выполнении сельскохозяйственных работ.

8. Разработанный экспериментальный образец телеметрической системы «Персональный ассистент механизатора» на основании оценки комбинаций настроек управления и текущих параметров работы машинно-тракторного агрегата предоставляет оператору оптимальные решения, что позволило обеспечить снижение энергозатрат в пределах 15-30 МДж/га и повысить энергоэффективность выполнения сельскохозяйственных операций на 12-14 %.

9. Внедрение разработанной телеметрической системы позволяет за год снизить эксплуатационные затраты и сэкономить от 38,07 до 286,76 тыс. руб. на один МТА. Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений – от 0,07 до 0,55 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Агеев, Л.Е.** Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов / Л.Е. Агеев – Л.: Колос, 1978. – 296 с.
2. **Агеев, Л.Е.** Сверхмощные тракторы сельскохозяйственного назначения / Л.Е. Агеев, В.С. Шкрабак, В.Ю. Моргулис-Якушев. – Л.: Агропромиздат, 1986. – 415 с.
3. **Андреев, О.П.** Моделирование рабочего процесса дизеля как объекта регулирования по частоте вращения / О. П. Андреев, О. Н. Слепцов // Международный технико-экономический журнал. – 2019. – № 3. – С. 63-70.
4. **Анискин, В.И.** Концепция развития сельскохозяйственных тракторов и тракторного парка России на период до 2010г / В.И. Анискин, Н.М. Антышев, Н.И. Бычков – М.: ВИМ, 2002. – 51 с.
5. **Антонец, Д.А.** Теоретические основы количественной оценки уровня технической эксплуатации тракторов / Д.А. Антонец // Техника в сел. хоз-ве. – 1989. – № 6.
6. **Бережная, Е.В.** Математические методы моделирования экономических систем: учеб. пособ. – 2-е изд., перераб. и доп. / Е.В. Бережная, В.И. Бережной. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 432 с.
7. **Бобровник, А.И.** Улучшение эксплуатационных качеств ходовых систем тракторов «БЕЛАРУС» / А.И. Бобровник, Т.А. Варфоломеева, М.А. Струк // Мелиорация – 2015. – С. 173-186.
8. **Бойков, В.П.** Состояние и перспективы развития работ по тракторным шинам / В.П. Бойков, В.М.Белковский и др. – М.: ЦНИИТЭИ тракторсельхозмаш, 1983. – № 5. – С. 1–61.
9. **Болтинский, В.Н.** Теория, конструкция и расчет тракторных и автомобильных двигателей / В.Н. Болтинский – М.: Сельхозиздат, 1962. – 391 с.
10. **Буклагин, Д.С.** Проблемы оценки инновационности продукции / Д.С. Буклагин // Техника и оборуд. для села. – 2013. – № 1. – С. 30-34.

11. **Буклагин, Д.С.** Сравнительные испытания – основа модернизации сельскохозяйственной техники // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: матер. Междунар. науч.-техн. конф. Т. 2. – Минск: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хоз-ва», 2014. – С. 13-18.

12. **Бурак, П.И.** Анализ функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности испытанной сельскохозяйственной техники и оборудования : Аналитический обзор / П.И. Бурак, И.Г. Голубев, Н.П. Мишуров [и др.]. – Москва : ФГБНУ "Росинформагротех", 2022. – 128 с.

13. **Бурбокин, И.Н.** Концепция развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства России на 1995 г. и на период до 2000 г / И.Н. Бурбокин, Л.П. Кормановский, Н.М. Морозов [и др.]. – Москва : Редакция журнала "Доклады РАСХН", 1992. – 188 с.

14. **Веденяпин, Г.В.** Эксплуатация машинно-тракторного парка / Г.В. Веденяпин, Ю.К. Кирбая, М.П. Сергеев. – М.: Колос, 1968. – 342 с.

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

16. **Верещагин, Н.И.** Организация и технология механизированных работ в растениеводстве / Н.И. Верещагин, А.Г. Левшин, А.Н. Скороходов и др. – 9-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 416 с.

17. **Видикер, А.А.** Адаптация аппаратных средств измерительно-информационного комплекса для проведения контрольного динамометрирования энергонасыщенных МТА / А.А. Видикер, Н.Н. Бережнов: материалы VIII региональной науч.-практ. конф. студентов и аспирантов, посвященной 80-летию НГАУ-НСХИ (10-11 ноября 2016 г.). – Новосибирск: Новосибирский государственный аграрный университет, 2016. – С. 52–58.

18. **Ворохобин, А.В.** Результаты исследований усовершенствованной конструкции тягово-сцепного устройства трактора. / А.В. Ворохобин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – № 4 (51).

19. **Гольятпин, В.Я.** Анализ качества и технического уровня сельскохозяйственной техники / В.Я. Гольятпин, Л.М. Колчина, Т.А. Щеголихина, М.Н. Хлепитько. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2013. – 144 с.

20. **Горшков, Ю.Г.** Регистрирующий комплекс для исследования буксования и КПД дифференциала и движителя колесной машины / Ю.Г. Горшков, Ю.Б. Четыркин, А.А. Калугин // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 11. – С. 13–15.

21. **Горячкин, В.П.** Собр. соч. – Т.1-3 / В.П. Горячкин – М.: Колос, 1965.

22. **Горячкин, М.И.** Экономическое обоснование способов механизации сельскохозяйственного производства / М.И. Горячкин – М.: Сельхозиздат, 1962. – 264 с.

23. ГОСТ 18509–88 Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний – М.: Издательство стандартов, 1988. – 77 с.

24. ГОСТ 27021–86 Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Тяговые классы – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 8 с.

25. ГОСТ 30745-2001 Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.

26. ГОСТ 34631-2019 Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки. – М.: Стандартиформ, 2020. – 13 с.

27. ГОСТ 7057–2001 Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 11 с.

28. ГОСТ 7463-2003 Шины пневматические для тракторов и сельскохозяйственных машин. Методы определения воздействия движителей на почву. - М.: Изд-во стандартов, 2004. - 26 с.

29. ГОСТ Р 52777–2007 Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки. – М.: Стандартиформ, 2008. – 10 с.

30. ГОСТ Р 58656-2019 Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву. - М.: Изд-во стандартов, 2019. - 25 с.

31. **Грибов, И.В.** Мощность – основной показатель для трактора тягово-энергетической концепции / И.В. Грибов, И.В. Перевозчикова // Техника и технологии АПК. – 2017. – № 5. – С. 18–21.

32. **Гуськов, В.В.** Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов / В.В.Гуськов. – М.: Машиностроение, 1966. – 196 с.

33. **Емельянов, А.М.** Повышение эффективности использования трактора тягового класса 1,4 за счёт треугольного гусеничного движителя / А.М. Емельянов, Е.М. Шпилев // Вестник Алтайского аграрного университета. – 2011. – № 12 (86).

34. **Зоробян, С.Р.** Динамика тракторных моторно-трансмиссионных установок с двигателями постоянной мощности / С.Р. Зоробян // Тракторы и сельхозмашины. – 1986. – № 8. – С. 11-14.

35. **Иванов, А.Б.** Инструментальный контроль расхода топлива как средство повышения эффективности использования машинно-тракторного парка на предприятиях АПК / А.Б. Иванов // Техника и оборудование для села. – 2019. – № 5(263). – С. 22-25.

36. **Иванов, А.Б.** К вопросу определения буксования сельскохозяйственных тракторов / А.Б. Иванов, В.Е. Таркинский, В.Ю. Ревенко // Техника и оборудование для села. – 2021. – № 3(285). – С. 14–19.

37. **Иванов, А.Б.** Новый метод определения энергетических параметров работы машинно-тракторных агрегатов / А.Б. Иванов, В.Е. Таркинский, Н.В. Трубицын // Техника и оборудование для села. – 2020. – № 9(279). – С. 10-15.

38. **Иванов, А.Б.** Применение одночастотных GNSS-приемников для определения буксования сельскохозяйственных тракторов посредством технологии прямых доплеровских измерений / А.Б. Иванов // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : Материалы XIII Международной научно-практической интернет-конференции, п. Правдинский,

Московская обл., 08–10 июня 2021 года. – п. Правдинский, Московская обл.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса (Правдинский), 2021. – С. 379-384.

39. **Иванов, А.Б.** Применение одночастотных GNSS-приемников для определения буксования сельскохозяйственных тракторов посредством технологии точечного позиционирования / А.Б. Иванов // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : Материалы XIII Международной научно-практической интернет-конференции, п. Правдинский, Московская обл., 08–10 июня 2021 года. – п. Правдинский, Московская обл.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса (Правдинский), 2021. – С. 373-378.

40. **Иванов, А.Б.** Энергонасыщенность современных сельскохозяйственных тракторов / А. Б. Иванов // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : Материалы XII Международной научно-практической интернет-конференции, п. Правдинский Московской области, 08–10 июня 2020 года. – п. Правдинский Московской области: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2020. – С. 469-473.

41. **Иванов, А.Б.** Сравнительная оценка методов определения буксования / А.Б. Иванов, В.Е. Таркинский, В.Ю. Ревенко // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : Материалы XIV Международной научно-практической Интернет-конференции, Московская обл., Пушкинский р-н, рп. Правдинский, 07–09 июня 2022 года. – Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2022. – С. 692-700.

42. **Иофинов, С.А.** Эксплуатация машинно-тракторного парка / С.А. Иофинов. – М.: Колос, 1974 – 480 с.

43. **Иофинов, С.А.** Эксплуатация машинно-тракторного парка : учебник для вузов / С.А. Иофинов, Г.П. Лышко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1984. – 352 с.

44. Исследование и разработка нового метода оптимизации балластировки трактора путем определения буксования колес с помощью элементов спутниковой навигации: отчет о НИР. – М.: ФГБНУ «РОСИНФОРМАГРОТЕХ», 2021. - 56 с.

45. **Калачин, С.В.** Оптимизация режимов работы машинно-тракторного агрегата на основе непрерывного контроля интенсивности изменения его эксплуатационных параметров: дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / С.В. Калачин. – Саранск, 2011. – 368 с.

46. **Кацыгин, В.В.** Перспективные мобильные энергетические средства (МЭС) для сельскохозяйственного производства. / В.В. Кацыгин, Г.С. Горин, А.А. Зенькович. – Минск: Наука и техника, 1982. – 272 с.

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

48. **Кринко, М.С.** Рациональное сочетание тракторов, основных агрегатов, полевых условий и технологических операций: Автореф. Дис. канд. наук. – Мн., 1984.

49. **Кринко, М.С.** Системный анализ эффективности скоростных тракторов в сложных полевых условиях / М.С. Кринко. – Мн.: Наука и техника, 1980. – 208 с.

50. **Кряжков, В.М.** Тенденции развития рынка сельскохозяйственных тракторов России по мощностной структуре и объему реализации с 2008 по 2013 годы / В.М. Кряжков, В.Г. Шевцов, Г.С. Гурылев, А.В. Лавров // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2014. – № 3(15). – С. 54-57.

51. **Кряжков, В.М.** Проблемы формирования инновационного парка сельскохозяйственных тракторов России / В.М. Кряжков, З.А. Годжаев, В.Г.

Шевцов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2015. – № 3. – С. 9-14.

52. **Ксенович, И.П.** Внедорожные тягово-транспортные системы: проблемы защиты окружающей среды / И.П. Ксенович // Тракторы и сельхозмашины. – 1996. – № 6. – С. 18–22.

53. **Ксенович, И.П.** Ходовая система – почва – урожай / И.П. Ксенович, В.А. Скотников, М.И. Ляско – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.

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

55. **Куликов, Н.К.** Элементы динамики процесса буксования трактора / К.Н. Куликов. // Машиностроение: Изв. вузов. – 1961. – № 2. – С. 111–118.

56. **Курасов, В.С.** Тракторы и автомобили, применяемые в сельском хозяйстве: Учебное пособие / В.С. Курасов, Е.И. Трубилин, А.И. Тлишев – Краснодар: Кубанский ГАУ, 2011. – 132 с.: ил.

57. **Кутьков, Г.М.** Балластирование тракторов. / Г.М. Кутьков, И.В. Грибов, Н.В. Перевозчикова // Тракторы и Сельхозмашины. – 2017. – № 9.

58. **Кутьков, Г.М.** Развитие технической концепции трактора. / Г.М. Кутьков // М.: КолосС, – 2019. – 27-35 с.

59. **Кутьков, Г.М.** Теория трактора и автомобиля / Г.М. Кутьков. – М.: Колос, 1996. – 288 с.

60. **Кутьков, Г.М.** Трактор второго поколения / Г.М. Кутьков – М.: ФБГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина, 2013. – 104 с.

61. **Кутьков, Г.М.** Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства: учебник / Г.М. Кутьков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 508 с.

62. **Кутьков, Г.М.** Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства / Г.М. Кутьков – М.: Инфра-М, 2014. – 506 с.

63. **Лачуга, Ю.Ф.** Результаты научных исследований агроинженерных научных организаций по развитию цифровых систем в сельском хозяйстве / Ю.Ф. Лачуга, А.Ю. Измайлов, Я.П. Лобачевский, Ю.Х. Шогенов // Техника и оборудование для села. – 2022. – № 3(297). – С. 2-9.

64. **Лачуга, Ю.Ф.** Результаты научных исследований агроинженерных научных организаций по развитию цифровых систем в сельском хозяйстве (окончание) / Ю.Ф. Лачуга, А.Ю. Измайлов, Я.П. Лобачевский, Ю.Х. Шогенов // Техника и оборудование для села. – 2022. – № 4(298). – С. 2-6.

65. **Левшин, А.Г.** Разработка методов повышения эффективности использования мобильных сельскохозяйственных агрегатов как человеко-машинных систем: специальность 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Левшин Александр Григорьевич. – Москва, 2000. – 323 с.

66. **Левшин, А.Г.** Планирование и организация эксперимента / А.Г. Левшин, А.А. Левшин, А.Е. Бутузов, Н.А. Майстренко. – Москва : Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2016. – 65 с.

67. **Липкович, Э.И.** Интеллектуализация технического оснащения АПК / Э.И. Липкович, А.А. Серегин // АПК: экономика, управление. – 2015. – № 1. – С. 63-75.

68. **Листопад, Г.Е.** Совершенствование машиноиспользования в сельском хозяйстве / Г.Е. Листопад // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1998. – № 8. – С. 7-10.

69. **Лобачевский, Я.П.** Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве / Я.П. Лобачевский, Ю.С. Ценч // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2022. – Т. 16, № 4. – С. 4-12.

70. **Лопарев, А.А.** Исследование буксования ведущих колес трактора в транспортно-технологическом сельскохозяйственном агрегате / А.А. Лопарев, А.С. Комкин: Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной

энергетики: Материалы 9-й междунар. науч.-прак. конф. «Наука – Технология – Ресурсосбережение.» – Киров: Издательство Вятская ГСХА, 2016. – С. 158–161.

71. **Масловский, В.И.** Энергетические показатели машин для обработки почвы / В.И. Масловский, А.Б. Иванов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 118. – С. 1187-1201.

72. **Наумов, Е.С.** Ходовые системы колесных тракторов (конструкция) / Е.С. Наумов А.П. Парфенов В.М. Шарипов – М.: Московский государственный технический университет «МАМИ». – 1999.

73. **Оловников, И.В.** Методы обработки информации, полученной от экспертов / И.В. Оловников// Вестник ИрГСХА. – 2009. – № 36. – С. 74–86.

74. **Поливаев, О.И.** Теория трактора и автомобиля / О.И. Поливаев, В.П. Гребнев, А.В. Ворохобин – СПб.: Издательство «Лань». – 2016. – 232 с.

75. Проблема воздействия движителей на почву и эффективные направления ее решения: Тезисы докладов Международной научно-практической конференции, Москва, 23–25 сентября 1998 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 1998. – 112 с.

76. Проведение исследований и разработка нового метода определения оптимального режима работы дизельных двигателей в реальном режиме времени: отчет о НИР. – М.: ФГБНУ «РОСИНФОРМАГРОТЕХ», 2020. - 93 с.

77. Проведение исследований и разработка устройства для повышения эффективности эксплуатации машинно-тракторных агрегатов: отчет о НИР. – М.: ФГБНУ «РОСИНФОРМАГРОТЕХ», 2022. - 112 с.

78. **Пупонин, А.И.** Депрессия урожая сельскохозяйственных культур при уплотнении почвы и приемы ее снижения / А.И. Пупонин, Н.С. Матюк // Сб. науч. тр. ВИМ, Т. 118. – 1988. – С. 75–86.

79. РБК.РУ [Электронный ресурс]: Эксперты спрогнозировали рост среднего срока службы смартфона В России –

https://www.rbc.ru/technology_and_media/01/12/2021/61a62d199a7947086a0ccf8b
(дата обращения 25.12.21).

80. **Ревенко, В.Ю.** Новые методы определения площади контактирующей поверхности шин сельскохозяйственных машин и тракторов / В.Ю. Ревенко, А.Б. Иванов, Д.А. Петухов // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 2(308). – С. 10-15.

81. **Ревенко, В.Ю.** Площадь контакта шины с опорой, как функция вертикальной нагрузки и внутришинного давления / В.Ю. Ревенко, В.И. Скорляков, А.Б. Иванов // Наука в центральной России. – 2022. – № 4(58). – С. 74-83.

82. **Ревенко, В.Ю.** Повышение эффективности машинно-тракторных агрегатов с колесными тракторами классов 1,4, 2 и 3 на основе оптимизации параметров движителей: специальность 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ревенко Валерий Юрьевич. – Москва, 2006. – 182 с.

83. **Ревенко, В.Ю.** Применение шин увеличенной размерности, как способ повышения эффективности работы машинно-тракторного агрегата / В.Ю. Ревенко, А.Б. Иванов, В.И. Скорляков // Наука в центральной России. – 2022. – № 2(56). – С. 22-29.

84. **Ревенко, В.Ю.** Уточненная методика определения площади опорной поверхности шин современной сельскохозяйственной техники / В.Ю. Ревенко, С.С. Фролов, А.Н. Ткаченко, А.Б. Иванов // Техника и оборудование для села. – 2021. – № 7(289). – С. 10-15.

85. **Русанов, В.А.** Проблема воздействия движителей на почву и эффективное направление ее решения / В.А. Русанов, Н.М. Антышев, В.П. Кузнецов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1994. – № 5. – С. 36-38.

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

87. **Рыков, В.Б.** Энергетические критерии в обосновании технических средств и рациональном комплектовании технологических комплексов машин /

В.Б. Рыков, С.И. Камбулов, А.В. Пономарев, Е.И. Трубилин // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : Сборник тезисов по материалам Всероссийской (национальной) конференции, Краснода, 19 декабря 2019 года / Ответственный за выпуск А. Г. Коцаев. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2019. – С. 213-214.

88. **Саакян, Д.Н.** Система показателей комплексной оценки мобильных машин / Д.Н. Саакян. – М.: Агропромиздат, 1988. – 420 с.

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

90. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Исследователь» № 2015619836 / Таркинский В.Е., Трубицын Н.В.; зарегистрированной в Реестре программ 15.09.2015. – 1 с.

91. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615101 Российская Федерация. ПАМ-трансмиссер : № 2023615101 : заявл. 27.02.2023 : опубл. 10.03.2023 / В.Е. Таркинский, А.Б. Иванов; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса».

92. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022618523 Российская Федерация. Умный помощник тракториста: № 2022612738: заявл. 28.02.2022: опубл. 12.05.2022 / А.В. Лютый, А.Б. Иванов; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса».

93. **Селиванов, Н.И.** Балластирование колесных тракторов на обработке почвы. / Н.И. Селиванов, Ю.Н. Макеева // Вестник КрасГАУ – 2015. – № 5– С. 77-81.

94. **Селиванов, Н.И.** Рациональное балластирование энергонасыщенных колесных тракторов разной комплектации. / Н.И. Селиванов // Вестник КрасГАУ – 2016. – № 8 – С. 123-129.

95. **Селиванов, Н.И.** Рациональное использование трактора versatile 2375 в технологиях почвообработки. / Н.И. Селиванов, Д.А. Седаков // Вестник КрасГАУ. – 2019. – № 1 – С. 138-143.

96. **Симарев, Ю.М.** Математические методы анализа эффективного использования сельскохозяйственной техники / Ю.М. Симарев // АПК, экономика, управление. – 1999. – № 6. – С. 59-64.

97. **Скойбеда, А.Г.** Научные основы и принципы создания управляемых приводов ходовых систем сельскохозяйственных тракторов : дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 / А.Г. Скойбеда. – Минск, 1980. – 364 с.

98. **Скотников, В.А.** Основы теории и расчета трактора и автомобиля / В.А. Скотников, А.А. Машенский, А.С. Солонский. – М.: Агропромиздат, 1986. – 384 с.

99. **Сорокин, Н.Т.** К вопросу оценки потребительских свойств сельскохозяйственных машин и оборудования / Н.Т. Сорокин, А.Т. Табашников, В.О. Марченко // С.-х. машины и технологии – М.: ВИМ, 2013. – С. 41-43.

100. **Таран, Д.А.** Устройство для определения буксования колёсных тракторов с одной ведущей осью / Д.А. Таран, А.Д. Таран: Концепции фундаментальных и прикладных научных исследований: Материалы междунар. науч.-прак. конф. – Казань: Издательство ООО «АТЭРНА», 2017. – С. 56–58.

101. **Таркинский, В.Е.** Техническое средство для эксплуатационно-технологической оценки сельскохозяйственной техники / В.Е. Таркинский, Н.В. Трубицын, А.Б. Иванов // Техника и оборудование для села. – 2021. – № 12(294). – С. 7-9.

102. **Таркинский, В.Е.** Цифровые методы и средства определения функциональных характеристик сельскохозяйственных тракторов: специальность 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" : диссертация

на соискание ученой степени доктора технических наук / Таркинский Виталий Евгеньевич. – Москва, 2019. – 247 с.

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

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

105. **Таркинский, В.Е.** Совершенствование методов экономической оценки сельскохозяйственной техники / В.Е. Таркинский, С.А. Свиридова // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : сб. науч. тр. по итогам VIII Междунар. науч.-практ. конф. «ИнформАгро-2016». – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. – С. 458-460.

106. **Титоренко, А.Н.** Способы повышения тягово-сцепных свойств тракторов. / А.Н. Титоренко // Сборник научных трудов СЗНИИМЭСХ. – Вып. 73 – 2002.

107. **Трепененков, И.И.** Номинальная сила тяги сельскохозяйственного трактора / И.И. Трепененков, А.А. Юшин // Механизация и электрификация соц. сел. хоз-ва. – 1970. – № 12. – С. 17-18.

108. **Трубицын, Н.В.** Современные принципы измерения расхода топлива и первичные преобразователи для испытаний сельскохозяйственной техники / Н.В. Трубицын, В.Е. Таркинский // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 6. – С. 42–44.

109. **Федоренко, В.Ф.** Применение инерциальной навигации для определения буксования сельскохозяйственных тракторов / В.Ф. Федоренко, Н.П. Мишуров, Н.В. Трубицын, В.Е. Таркинский // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28. – Вып. 1. – С. 8–23.

110. **Федоренко, В.Ф.** Результаты анализа эффективности субсидируемой сельскохозяйственной техники / В.Ф. Федоренко, Н.П. Мишуров, Г.В. Дробин, В.И. Скорляков, Д.А. Петухов, С.А. Свиридова, А.С. Пронина, Ю.А. Юзенко, Е.С. Воронин, В.Н. Слесарев. И.С. Горячева. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2017. – 240 с.

111. **Федоренко, В.Ф.** Технические и технологические требования к перспективной сельскохозяйственной технике / В.Ф. Федоренко, Д.С. Буклагин, М.Н. Ерохин. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2011. – 248 с.

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

113. **Хайлис, Г.А.** Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г.А. Хайлис, М.М. Ковалев. – М.: Колос, 1994. – 172 с.

114. **Черноиванов, В.И.** Интеллектуальная сельскохозяйственная техника / В.И. Черноиванов, А.А. Ежевский, В.Ф. Федоренко. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех»), 2014. – 124 с.

115. **Чудаков, Д.А.** Основы теории и расчета трактора и автомобиля / Д.А. Чудаков. – М.: Колос, 1972. – 384 с.

116. **Чухчин, Н.Ф.** Технологические и агротехнические основы развития МЭС как трактора второго поколения тягово-энергетической концепции / Н.Ф. Чухчин, А.Р. Мусин – М.: ГОНТИ-НПО «НАТИ», 1983. – С. 312.

117. **Чухчина, Н.Ф.** Эксплуатационная технологичность конструкций тракторов / Н.Ф. Чухчина, В.М. Старикова. – М.: Машиностроение, 1982. – 256 с.

118. **Шароглазов, Б.А.** Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов / Б.А. Шароглазов, М.Ф. Фарафонов, В.В. Клементьев. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2005. – 404 с.

119. **Шатуновский, Г.М.** Технологичность конструкции сельскохозяйственных машин / Г.М. Шатуновский – М.: Машгиз, 1960. – 368 с.

120. **Шпилько, А.В.** Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. – Ч. 2 : Нормат.-справ. матер. / А.В. Шпилько. – М., 1998. – 252 с.
121. **Щитов, С.В.** Перераспределения сцепного веса между мостами трактора на ширину захвата, буксование и производительность машинно-тракторного агрегата. / С.В. Щитов, И.В. Бумбар, С.А. Иванов, Е.Е. Кузнецов, Е.В. Панова // АгроЭкоИнфо. – 2017. – С. 106.
122. **Эвиев, В.А.** Определение эксплуатационных показателей машинно-тракторного агрегата по характеристике трактора с участком постоянной тяговой мощности / В.А. Эвиев, П.В. Букаджинов, Н.Г. Очиров // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 12. – С. 18-21.
123. **Adams, B.T.** Modeling of Traction for Central Tire Inflation Systems / B.T. Adams // ASAE-Paper. - 2005. - №05 - P. 1109.
124. **Arvidsson, J.** Response of different crops to soil compaction Shortterm effects in Swedish field experiments / J. Arvidsson, I. Hekansson // Soil & Tillage Research – 2014 – №138. – P. 56–63.
125. **Bowman, A.W.** Applied smoothing techniques for data analysis / A.W. Bowman, A. Azzalini. – UK, Oxford: Oxford University Press, 1997. – 204 p.
126. **Brixius, W.W.** Traction prediction equations for bias ply tires / W.W. Brixius // ASAE-Paper. - 1987. - №87 - P. 1622.
127. **Cleveland, W.S.** Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots / W.S. Cleveland // J. Amer. Statist. Assoc. – 1979. – №74(368). – P. 829–836.
128. **Cleveland, W.S.** Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting / W.S. Cleveland, S.J. Devlin // Journal of the American Statistical Association. – 1988. – Vol. 83, P. 596–610.
129. **Cleveland, W.S.** Smoothing by local regression: principles and methods. In Statistical Theory and Computational Aspects of Smoothing / W.S. Cleveland, C. Loader. – Contributions to Statistics, W Härdle, M.G Schimek (eds). – Physica-Verlag HD, 1996. – P. 10– 49.

130. Datum Electronics. PTO monitoring system. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.datum-electronics.com/pto-power-monitoring-system.aspx.htm> (дата обращения 12.03.2020).

131. **David, A.** Heat Roadmap Europe: large-scale electric heat pumps in district heating systems /A. David, B.V. Mathiesen, H. Aeverfalk, S. Werner, H. Lund // Energies. - 2017 - 10(4) - P. 578.

132. Der neue Standart-Radialreisen fur die Land wirtscha: Continental: Berei-
fung furdie Landwi-rtschaft. “Schweiz. Landtechn – 2000 – 62. – P. 7-9.

133. **Domier, K.W.** Comparison of predicted and measured drawbar performance of tractors on agricultural soils / K.W. Domier, S.P.E. Persson // Can. Agr. Eng. - 1968. - 10:1. - P. 29-32

134. **Domier, K.W.** Traction Analysis of Nebraska Tractor Tests / K.W. Domier // TRANSACTIONS of the ASAE. - 1978. - Vol. 21, Iss. 2, - P. 244-248

135. **Hast, A.** The role of heat storages in facilitating the adaptation of district heating systems to large amount of variable renewable electricity / A. Hast, S. Rinne, S. Syri, J. Kiviluoma // Energy. - 2017 - №137 - P. 775-778

136. **Hewitt, Edward R.** The Principles Of The Wheeled Farm Tractor / Edward R. Hewitt // SAE Transactions. – 1919. – Vol. 14, Part I – P. 83-111

137. Institute of Agriculture and Natural Resources NEBRASKA TRACTOR TEST LABORATORY [Электронный ресурс]. – URL: <https://tractortestlab.unl.edu/> (дата обращения 10.02.2020).

138. ISO.ORG [Электронный ресурс]: ISO 789-9:2018(en) Agricultural tractors — Test procedures — Part 9: Power tests for drawbar – Режим доступа.: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:789:-9:ed-2:v1:en> (дата обращения 17.12.20).

139. **Ivanov, A.B.** Practical assessment of agricultural tractor wheel slip using a single-frequency GNSS receiver using direct Doppler measurements / A. B. Ivanov, D. A. Petukhov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Dushanbe, Virtual, 27–29 Oct 2021. - Vol. 1010. – Dushanbe: IOP Publishing Ltd, 2022. – P. 012153.

140. **Ivanov, A.B.** Increasing the efficiency of using the SUTB technology in the operation of agricultural units / A.B. Ivanov, N.P. Mishurov, V.E. Tarkivsky, E.E. Podolskaya // IOP conference series: earth and environmental science : Agriculture, field cultivation, animal husbandry, forestry and agricultural products Cep. 2, Smolensk, 25 Jan 2021. – Smolensk, 2021. – P. 022008.

141. **Ivanov, A.B.** Rational use of energy potential and reduction of the negative impact on the soil of agricultural tractor propellers using instrumental control of slipping / A.B. Ivanov, V.F. Fedorenko, V.E. Tarkivsky, D.A. Petkhov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 3, Mining, Production, Transmission, Processing and Environmental Protection, Moscow, 21 Apr 2021. – Moscow, 2021. – P. 012019.

142. **Ivanov, A.B.** Solving the problem of ballasting an agricultural tractor when performing agricultural operations / A.B. Ivanov // Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development in Agriculture : International Scientific and Practical Conference, Saratov, 20–24 Oct. 2021. – London: IOP Publishing Ltd, 2022. – P. 012076

143. **Ivanov, A.B.** The concept of a personal information system to improve the efficiency of agricultural tractor management / A.B. Ivanov, V.E. Tarkivsky, N.V. Trubitsin // Proc. SPIE. – 2022. – 12296. – P. 2643112.

144. **Jarosl w, P.** Effects of repeated rolling of agricultural tractors on soil stress and deformation state in sand and loess / P. Jarosl w // Soil Tillage Res – 2005 – 82 – P. 77-88.

145. John Deere. Fuel Efficiency Guide. Everything to the drop! [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.deere.com/assets/publications/index.html?id=e0b3fdef#1> (дата обращения 18.02.2022).

146. **Jokiniemi, T.** Simple and cost effective method for fuel consumption measurements of agricultural machinery / T. Jokiniemi, H. Rossner, J. Ahokas // Agronomy Research Biosystem Engineering. Special Issue. – 2012. – № 1. – P. 97-107.

147. **Keen, A.** A review of the tractive performance of wheeled tractors and soil management in lowland intensive rice production/ A. Keen, N. Hall, P. Soni, M.D. Gholkar, S. Cooper, J. Ferdous // Journal of Terramechanics. – 2013 – № 50 – P. 45-62

148. **Keller, T.** 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. P. 1-12.

149. **Kocher, M.F.** Fuel consumption models for tractor test reports / M.F. Kocher, B.J. Smith, R.M. Hoy, J.C. Woldstad, S.K. Pitla // American Society of Agricultural and Biological Engineers. – 2017. – № 60 (3). – P. 693-701.

150. **Lancas, K.P.** Energy and time savings using “low/correct” inflation pressure in radial ply tires / K.P. Lancas, A.G. Santos Filho, S.K. Upadhyaya: Int. Conf. Agric. Engng., Madrid, 1996. - Report No. 96-A-021.

151. **Lankenau, Guillermo F.** An engineering review of the farm tractor’s evolution to a dominant design / G.F. Lankenau, A.G. Diaz, V. Winter: In Proceedings of the ASME 2018 International Design Engineering / Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2018, August 26-29, 2018, Quebec City, Quebec, Canada.

152. **Lepiksaar, K.** Improving CHP flexibility by integrating thermal energy storage and power-to-heat technologies into the energy system/ K. Lepiksaar, V. Mašatin, E. Latõšov, A. Siirde, A. Volkova // Smart Energy. - 2021 - Vol. 2 - P. 100022

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

154. LOESS Curve Fitting (Local Polynomial Regression) [Электронный ресурс]. URL: https://www.statsdirect.com/help/nonparametric_methods/loess.htm (дата обращения: 28.04.2021).

155. LOESS Regression and Smoothing With R - R-Statistics.co [Электронный ресурс]. URL: <http://r-statistics.co/Loess-Regression-With-R.html> (дата обращения: 28.04.2021).

156. LOESS Regression using Excel [Электронный ресурс]. URL:<https://real-statistics.com/regression/loess-regression/loess-regression-using-excel/> (дата обращения: 28.04.2021).
157. LOESS Smoothing - gists · GitHub [Электронный ресурс]. URL:<https://gist.github.com/HarryStevens/397a50a604666957e661e4c725c1022a> (дата обращения: 28.04.2021).
158. **Lührs, H.** Wirkungsgraduntersuchung an Ackerschlepperradreifen, ihre Bedeutung für den Schlepperkonstrukteur. TU München, Dissertation, 1958.
159. **Lund, H.** The status of 4th generation district heating: research and results / H. Lund, P.A. Ostergaard, M. Chang, S. Werner, S. Svendsen, P. Sorknæs, et al. // Energy – 2018 – №164 – P. 147-159.
160. Nebraska Tractor Test Laboratory. Test Reports [Электронный ресурс]. URL: <https://tractortestlab.unl.edu/test-page-nttl/> (дата обращения: 20.05.2021).
161. **Revenko, V.U.** Power balance of all-wheel drive mobile power vehicle / V.U. Revenko, A.B. Ivanov, D.A. Petukhov // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2022. – 1045. – P. 012080.
162. **Schjinning, P.** Predicted tyre-soil interface area and vertical stress distribution based on load-ing characteristics / P. Schjinning et. al. // Soil & Tillage Research – 2015 – 152 – P. 52-66.
163. **Schwanghart, H.** Effect of Reduced Tire Inflation Pressure on Agricultural Tires / H. Schwanghart: 6th European ISTVS Conference. – Vienna, – 1994, Vol. 1.
164. **Sheets, C.E.** Optimum tractor weight for maximum drawbar horsepower / C.E. Sheets // TRANSACTIONS of the ASAE. – 1967. – 10(6). – P. 790-792
165. Smoothing by Local Regression: Principles and Methods W.S. Cleveland and C.L. Loader (1996) [Электронный ресурс]. URL: <http://cm.bell-labs.com/cm/ms/departments/sia/doc/> (дата обращения: 23.04.2021).
166. Smoothing: Local Regression Techniques [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/45130357_Smoothing_Local_Regression_Techniques (дата обращения: 11.04.2021).

167. **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).

168. **Steiner, M.** Analyse, Synthese und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlupf-Kurve von Luftreifen auf nachgiebigem Boden. TU München, Dissertation, 1979.

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

170. **Trubitsin, N.V.** System for measuring the depth of stroke of the working bodies of tillage machines / N.V. Trubitsin, V.E. Tarkivskiy, V.N. Trubitsin // Eurasian Union of Scientists. – 2018. – No. 11-2(56). – P. 46-49.

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

172. **Zoz, F.M.** Effect of “Correct” Pressure on Tractive Efficiency of Radial Ply Tires / F.M. Zoz, R.J. Turner // ASAE-Paper - 2003 - №94 - P. 1051.

ПРИЛОЖЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022618523

«Умный помощник тракториста»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (ФГБНУ «Росинформагротех») (RU)*

Авторы: *Лютый Алексей Владимирович (RU), Иванов Артем Борисович (RU)*



Заявка № 2022612738

Дата поступления 28 февраля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 мая 2022 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023615101

«ПАМ-трансммиттер»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (ФГБНУ «Росинформагротех»)* (RU)

Авторы: *Таркивский Виталий Евгеньевич* (RU), *Иванов Артем Борисович* (RU)



Заявка № 2023613889

Дата поступления 27 февраля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 марта 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «НПЦ
Электропривода «Вектор»
Чистосердов В.Л.

Чистосердов

Дата « 13 » апреля 2023 г.



Акт

внедрения результатов диссертационной работы

Иванова Артема Борисовича

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы Иванова Артема Борисовича на тему «Разработка телеметрической системы повышения энергоэффективности машинно-тракторных агрегатов» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 4.3.1 - Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса используются при разработке алгоритмов управления электромеханической трансмиссией (ЭМТ) тракторов сельскохозяйственного назначения (проект «ЭМТ по схеме центрального привода для сельскохозяйственного трактора с шарнирно-сочлененной рамой мощностью 250 л.с.»).

По результатам исследований сделан вывод о том, что внедрение результатов диссертационной работы позволяет повысить эффективность совмещения характеристик системы двигатель-электрогенератор-электродвигатель и улучшить динамические характеристики трансмиссии на переменных нагрузочных режимах.

Председатель комиссии

А.Б. Виноградов

д.т.н. А.Б. Виноградов

Члены комиссии

Н.Е. Гнездов
А.А. Коротков

к.т.н. Н.Е. Гнездов

к.т.н. А.А. Коротков

УТВЕРЖДАЮ
Директор
ФГБУ «Северо-Кавказская МИС»
 Г.А. Жидков

Дата « 18 » 04 2023 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы

Иванова Артема Борисовича

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы Иванова Артема Борисовича на тему «Разработка телеметрической системы повышения энергоэффективности машинно-тракторных агрегатов» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 4.3.1 - Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса внедрены в процесс испытаний тракторов и сельскохозяйственных машин на машиноиспытательной станции.

В ФГБУ «Северо-Кавказская МИС» нашли применение в качестве вспомогательных методик при настройке режимов работы испытываемой техники при проведении тяговых испытаний тракторов, а также при проведении энергетической оценки сельскохозяйственных машин, разработанные методы определения мощности двигателя, фактической скорости движения и буксования движителей трактора.

Председатель комиссии:

А.В.Калюжный

Члены комиссии:

Г.Ю. Вишневская

И.Н. Рудик
