

На правах рукописи



Макеева Юлия Николаевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ПРИ
БАЛЛАСТИРОВАНИИ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ КОЛЕСНЫХ
ТРАКТОРОВ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»

Научный руководитель

Селиванов Николай Иванович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Окунев Геннадий Андреевич
доктор технических наук, профессор
кафедры «Эксплуатации машинно-тракторного парка им. профессора М.П. Сергеева» ФГБОУ ВО ЮУрГАУ

Щукин Сергей Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Технологических машин и технологий машиностроения»
ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится 13 декабря 2017 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038 г. Барнаул, пр. Ленина, 46, тел./факс: 8 (3852) 36-71-29; <http://www.altstu.ru>; e-mail: ntsc@desert.secna.ru, epb_401@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» и на официальном сайте университета <https://www.altstu.ru/media/f/Dissertaciya-Makeevoy-Yu.N..pdf>

Автореферат разослан _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Куликова Лидия Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы на российском рынке сельскохозяйственных тракторов отмечается повышенное внимание к колесным энергонасыщенным тракторам улучшенной классической компоновки 4К4а мощностью 180–300 кВт с регулируемыми эксплуатационными параметрами. Рациональное использование таких тракторов в составе почвообрабатывающего агрегата определяет основные показатели эффективности реализуемой технологии обработки почвы, как наиболее энергоемкой операции. Особенно актуальной является проблема повышения степени использования потенциальных возможностей трактора за счет оптимального согласования его тягово-скоростных режимов с характеристиками почвообрабатывающих машин и агротребованиями.

Параметры и режимы работы тракторов в составе почвообрабатывающих агрегатов разного технологического назначения должны удовлетворять условиям ресурсосбережения. Такой подход обеспечивает высокий уровень адаптации тракторов к сельскохозяйственным ландшафтам, технологиям и другим природно-производственным факторам с наименьшим расходом соответствующих ресурсов.

Поэтому обоснование основных принципов и условий оптимизации параметров и режимов работы энергонасыщенных колесных тракторов для эффективного использования почвообрабатывающих агрегатов разного технологического назначения является актуальным и перспективным направлением экономии топливно-энергетических ресурсов.

Работа выполнена по тематическому плану научно-исследовательских работ Красноярского ГАУ в соответствии с координационным планом научного обеспечения АПК РФ (проблема IX, задание 03) на 2012–2017 гг.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие науки о производственной эксплуатации и повышении эффективности использования энергонасыщенных колесных тракторов в технологиях почвообработки внесли Л.Е. Агеев, П.А. Амельченко, Ю.Г. Горшков, Б.Д. Докин, А.А. Зангиев, Н.В. Краснощеков, В.С. Красовских, Г.М. Кутьков, Г.А. Окунев, А.П. Парфенов, А.М. Плаксин, В.А. Самсонов, Н.И. Селиванов, К.А. Хафизов, С.В. Щитов, В.А. Эвиев и другие ученые. При этом установлено, что на современном этапе развития отрасли растениеводства особую актуальность приобретает проблема адаптации нового поколения энергонасыщенных тракторов к зональным технологиям почвообработки. Однако ограниченный опыт эксплуатации и недостаточный объем научно-технической информации требуют формирования и систематизации основных принципов и методов ресурсосберегающего использования таких тракторов в составе почвообрабатывающих агрегатов разного технологического назначения.

Цель работы. Повышение эффективности использования агрегатов на базе энергонасыщенных тракторов колесной формулы 4К4а в зональных технологиях основной обработки почвы путем их рационального балластирования.

Задачи исследования:

- 1) проанализировать современные технологии почвообработки, тенденции развития, рынка и адаптации энергонасыщенных колесных тракторов к природно-производственным условиям;
- 2) разработать структурную схему, модели и алгоритм оптимизации эксплуатационных режимов и параметров почвообрабатывающих агрегатов на базе энергонасыщенных колесных тракторов;

3) разработать методику и провести экспериментальные исследования по обоснованию тягово-скоростных диапазонов использования и показателей эффективности адаптации колесных тракторов к условиям режима рабочего хода почвообрабатывающих агрегатов разного технологического назначения;

4) установить условия рационального балластирования и выбора типоразмеров мощности колесных 4К4а тракторов для зональных технологий основной обработки почвы;

5) разработать рекомендации по адаптации энергонасыщенных колесных 4К4а тракторов разной комплектации в составе почвообрабатывающих агрегатов к природно-производственным условиям АПК Красноярского края.

Объект исследования. Показатели рабочего хода почвообрабатывающих агрегатов при балластировании энергонасыщенных колесных тракторов.

Предмет исследования. Закономерности формирования показателей рабочего хода почвообрабатывающих агрегатов при балластировании энергонасыщенных колесных 4К4а тракторов.

Научная гипотеза. Повышение эффективности использования почвообрабатывающих агрегатов на базе энергонасыщенных тракторов колесной формулы 4К4а может быть достигнуто за счет их рационального балластирования для адаптации тягово-скоростных режимов работы и эксплуатационных параметров к зональным технологиям основной обработки почвы.

Научная новизна работы:

- структура системы адаптации тракторов и агрегатов к зональным технологиям основной обработки почвы;

- модели и алгоритмы многоуровневой оптимизации режимов и параметров энергонасыщенных колесных тракторов при использовании в составе агрегатов для операций основной обработки почвы;

- результативные признаки адаптации управляемых параметров энергонасыщенных колесных 4К4а тракторов к условиям режима рабочего хода агрегатов в зональных технологиях почвообработки;

- условия рационального балластирования и выбора типоразмеров мощности энергонасыщенных колесных 4К4а тракторов для адаптации к зональным технологиям основной обработки почвы.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1) основные теоретические положения системной адаптации к технологиям почвообработки и ландшафтам энергонасыщенных колесных тракторов с использованием в качестве основного показателя технологичности их удельной массы;

2) методика и результаты адаптации управляемых параметров энергонасыщенных колесных тракторов и агрегатов к зональным технологиям основной обработки почвы;

3) рекомендации и номограммы по балластированию энергонасыщенных колесных 4К4а тракторов при использовании в составе почвообрабатывающих агрегатов разного технологического назначения;

4) рациональные параметры колесных 4К4а тракторов и почвообрабатывающих агрегатов для природно-производственных условий агрозоны 6.2 Сибирского федерального округа (СФО).

Методология и методы исследования включали определение условий оптимальной адаптации энергонасыщенных колесных тракторов к операционным

технологиям почвообработки на основе многоуровневого системного анализа, моделирования рациональных параметров и режимов работы с учетом условий их балластирования.

Положения, выносимые на защиту:

1) структура, модели и алгоритм многоуровневой системы оптимизации эксплуатационных параметров энергонасыщенных колесных тракторов и агрегатов для операций основной обработки почвы;

2) результаты теоретических и экспериментальных исследований эффективности технологической адаптации при балластировании энергонасыщенных колесных тракторов улучшенной классической компоновки.

Степень достоверности и апробация научных результатов.

Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы результатами теоретических и экспериментальных исследований не противоречат известным положениям наук «Теория трактора» и «Эксплуатация машинно-тракторного парка» и соответствуют опубликованным ранее материалам по теме исследования.

Основные положения и результаты работы доложены, обсуждены и одобрены на:

- XIII международной научно-практической конференции «Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития» (Красноярск 2014);

- международной научно-практической конференции «Проблемы развития АПК Саяно-Алтая» (Абакан 2015);

- VIII международной научно-практической конференции «Инновационные тенденции развития Российской науки» (Красноярск 2015);

- I заочной международной научно-практической конференции «Эпоха науки» (Ачинск 2015);

- IX международной научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные тенденции развития Российской науки» (Красноярск 2016);

- международной научно-практической конференции «Инновационная наука: прошлое, настоящее, будущее» (Уфа 2016);

- II заочной международной научно-практической конференции «Эпоха науки» (Ачинск 2016);

- международной научно-практической конференции «Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития» (Красноярск 2017).

Научно-практические рекомендации «Формирование и использование тракторного парка в агропромышленном комплексе Красноярского края», включающие рациональное использование энергонасыщенных колесных 4К4а тракторов в зональных технологиях почвообработки, утверждены Министерством сельского хозяйства Красноярского края и реализованы предприятиями региона: ОАО «Назаровоагроснаб» (официальный дилер ОАО «Ростсельмаш»); ООО «Агро-Мастер Красноярск» (официальный дилер – New Holland Agriculture на территории Красноярского края); ООО «Сиб-Агро» (официальный дилер John Deere); отделом сельского хозяйства администрации Ачинского района – при эксплуатации энергонасыщенных колесных 4К4а тракторов, формировании перспективного тракторного парка и повышении квалификации инженерно-технических работников; ООО «Агросфера», ИП «КФХ Цебиков Р.В.», ИП «КФХ Кильтре О.В.», ИП «КФХ Третьяков А.С.», АО «Агрохолдинг «Сибиряк», ИП «КФХ Хафизов С.В.»; в учебном процессе и практике научных исследований ФГБОУ ВО «Красноярский ГАУ».

Личный вклад соискателя состоит в разработке моделей и алгоритма системы оптимизации эксплуатационных параметров энергонасыщенных колесных тракторов и агрегатов для операционных технологий основной обработки почвы. Другие результаты (в том числе проведение экспериментальных исследований, обработка и апробация их результатов) получены в соавторстве с д.т.н., профессором Н.И. Селивановым и к.т.н., доцентом В.Н. Запрудским.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Научные положения, приведенные в диссертации, соответствуют специальности 05.20.01 – «Технологии и средства механизации сельского хозяйства», в частности, области исследования П.5 «Разработка методов повышения надежности и эффективности функционирования производственных процессов, использования агрегатов, звеньев, технологических комплексов и поточных линий».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе одиннадцать в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации материалов кандидатских диссертаций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 165 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списков условных обозначений и использованной литературы, приложений. Содержит 41 рисунок и 37 таблиц. Список литературы включает 136 наименования. Пять приложений представлены на 28 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены основные положения и результаты исследования, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса» проведен анализ природно-производственных условий эксплуатации тракторов в АПК Красноярского края, который относится к Восточно-Сибирской агроклиматической зоне 6.2 Сибирского федерального округа (СФО), рассмотрены современные технологии почвообработки, тенденции развития тракторов, состояние и перспективы формирования тракторного парка. Показана актуальность проблемы и направления адаптации энергонасыщенных колесных 4К4а тракторов к природно-производственным условиям.

На основании выполненного анализа состояния проблемы и цели работы сформулированы задачи исследования.

Во второй главе «Теоретические основы адаптации колесных тракторов при использовании почвообрабатывающих агрегатов» обоснована структура, разработаны модели и алгоритм оптимизации эксплуатационных режимов и параметров энергонасыщенных колесных тракторов в составе агрегатов для зональных технологий основной обработки почвы.

Использование научно обоснованных принципов операционных технологий основной обработки почвы позволило обосновать структуру и модели общей системы (рисунок 1) адаптации тягово-скоростных диапазонов и параметров колесных тракторов и агрегатов к условиям рабочего хода и агрозоны.

Входными факторами являются характерные для зоны средняя длина гона $\bar{l}_z$, объем работ по разным технологиям V_i основной обработки почвы с параметрами удельного сопротивления K_{0i} и ΔK_i рабочих машин n_{TCi} и существующий или потребный типоразмерный ряд тракторов n_{TCj} с разной эксплуатационной мощностью $N_{эj}$.

Основной задачей первого уровня исследования является формирование отдельных групп, родственных по агротребованиям и энергоемкости операционных технологий $\bar{n}_i$, и оптимальная адаптация почвообрабатывающих агрегатов к этим группам технологий путем определения для каждой рационального диапазона изменения и номинального значения рабочей скорости $V_{opti}^* \leq V_{Hi}^* \leq V_{maxi}^*$.

Методы определения и значения адаптера V_H^* являются универсальными для любых почвенно-климатических зон с обоснованием ресурсосберегающих принципов воздействия рабочих органов и агрегатов на почву.

В качестве критериев оптимизации диапазона рабочих скоростей использованы эквиваленты производительности $K_{II} \rightarrow \max$ и удельных энергозатрат на единицу производительности $K_{EII} \rightarrow \min$, определяющие максимальное V_{max}^* и минимальное V_{min}^* значения рабочей скорости агрегата соответственно при чистой производительности $W \rightarrow \max$ и удельных энергозатратах $E_{II} \rightarrow \min$:

$$\begin{cases} W = P_{KP} \cdot V / K_0 \cdot \mu_K = P_{KP} \cdot K_{II} / K_0 \rightarrow \max; \\ K_{II} = V / \mu_K \rightarrow \max. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} E_{II} = P_{KP} \cdot V / W \rightarrow \min; \\ K_{EII} = E_{II} / W = \mu_K^2 / \eta_T \cdot V \rightarrow \min, \end{cases} \quad (2)$$

где $\mu_K = [1 + \Delta K \cdot (V^2 - V_0^2)]$.

Нижняя граница указанного диапазона $V_{min}^* < V_{opt}^* < V_{max}^*$ выбирается по компромиссному варианту из условия $K_E = K_{EII} / K_{II} \rightarrow \min$. Номинальное значение скорости $V_H^* \approx 0,5 \cdot (V_{opt}^* + V_{max}^*)$ является входным фактором для оптимальной адаптации параметров трактора к условиям режима рабочего хода агрегата на последующих уровнях.

На втором уровне поэтапно решаются задачи оптимизации тягового режима $\varphi_{KPH} = P_{KP} / G_{э}$, удельной m_{y0}^* и эксплуатационной массы $m_{э}^*$ энергомашины с энергетическим потенциалом $\xi_N^* \cdot N_{э}$ для обобщенных в вероятностно-статистическом смысле условий выполнения операций почвообработки соответствующих групп. Основными критериями оптимальности на этом уровне являются максимум тягового КПД $\eta_T \rightarrow \max$ трактора и минимум удельных энергозатрат $E_{II} \rightarrow \min$. При установленных значениях КПД трансмиссии η_{TP} , коэффициента сопротивления перекачиванию f и постоянных величин a, b, d

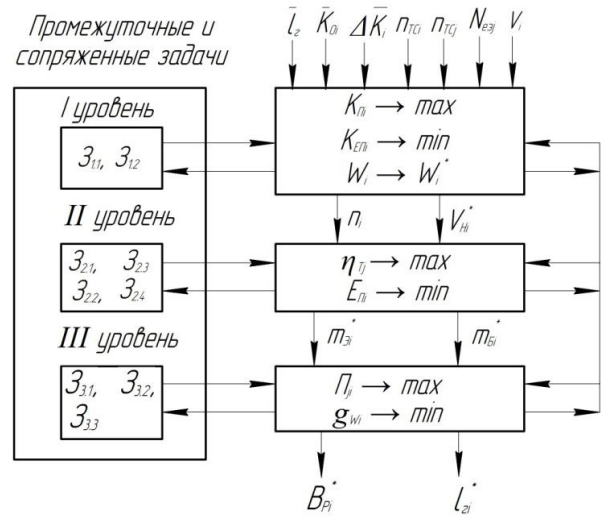


Рисунок 1 – Структурная схема технологической адаптации почвообрабатывающих агрегатов на базе энергонасыщенного трактора к природно-производственным условиям

зависимость тягового КПД η_T от коэффициента использования веса φ_{KP} целесообразно аппроксимировать из выражения

$$\eta_T = \eta_{TP} \cdot \left[\frac{\varphi_{KP}}{(\varphi_{KP} + f)} \right] \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{a \cdot (\varphi_{KP} - d)}{(b - \varphi_{KP} + d)} \right] \right\}. \quad (3)$$

Тяговый КПД не зависит от типоразмера трактора, а определяется конкретным конструктивным исполнением и условиями эксплуатации. Он имеет максимальное и некоторую зону допустимых по буксованию значений, соответствующих φ_{KPort} и φ_{KPmax} , которые ограничивают рациональный тяговый диапазон трактора с эксплуатационной массой m_{Σ} (рисунок 2).

Эффективное использование трактора с заданными параметрами двигателя ($N_{\text{еэ}}, K_M$) и установленным тяговым диапазоном ($\varphi_{KPort} - \varphi_{KPmax}$) на разных по энергоемкости группах родственных операций обработки почвы с обоснованными интервалами изменения рабочей скорости достигается регулированием эксплуатационной массы для обеспечения оптимальных значений показателя технологичности – удельной массы $m_{\text{уд}}^*$ (кг/кВт) в номинальном тягово-скоростном режиме:

$$m_{\text{уд}}^* = \frac{\eta_{TH} \cdot 10^3}{g \cdot \varphi_{KPH}^* \cdot V_H^*}. \quad (4)$$

Для уменьшения диапазона регулирования удельной массы при выполнении разных по энергоемкости групп операций номинальные значения коэффициента φ_{KPH} и соответствующий ему η_{TH} выбирались из следующих условий: на энергоемких операциях первой группы при $V_{H1}^* \varphi_{KPH1} = \varphi_{KPmax}$ с допустимым буксованием $\delta_0 \leq 0,15$; на операциях меньшей энергоемкости (второй группы) при $V_{H2}^* > V_{H1}^*$ $\varphi_{KPH2} \approx 0,5 \cdot (\varphi_{KPmax} + \varphi_{KPort})$; для операций третьей группы с наименьшей энергоемкостью при $V_{H3}^* > V_{H2}^*$ $\varphi_{KPH3} = \varphi_{KPort}$.

При вероятностном характере тяговой нагрузки $v_{PKPH} = \sigma_{PKPH}/P_{KPH}$ и соответственно $v_{\varphi_{KPH}} = v_{PKPH}$ изменение тягового КПД трактора $\lambda_{\eta_T} = \bar{\eta}_{TH}/\eta_{TH}$ эквивалентно снижению рабочей скорости $\lambda_{V_H} = \bar{V}_H/V_H$ из-за нелинейности кривой буксования, поэтому значение удельной массы на указанных режимах остается неизменным (рисунок 2).

Оптимальные значения эксплуатационной массы трактора m_{Σ}^* и номинальное тяговое усилие P_{KPH}^* для операций почвообработки каждой группы определялись по формулам

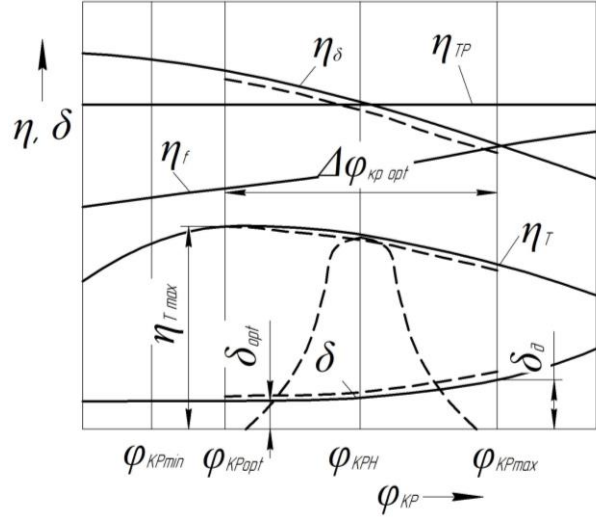


Рисунок 2 – Зависимости буксования и составляющих тягового КПД трактора от коэффициента использования сцепного веса: — — — $v_{\varphi_{KPH}} = 0$; - - - - $v_{PKPH} = v_{\varphi_{KPH}}$

$$\begin{cases} m_{\mathcal{E}i}^* = (\xi_{\bar{N}i}^* \cdot N_{e\mathcal{E}}) \cdot m_{y\partial i}^*; \\ P_{KPHi}^* = m_{\mathcal{E}i}^* \cdot g \cdot \varphi_{KPHi}. \end{cases} \quad (5)$$

Значение коэффициента использования мощности тракторного двигателя в зависимости от коэффициентов приспособляемости K_M и вариации момента сопротивления на валу v_{MC} устанавливалось по уравнению

$$\xi_{\bar{N}i}^* \geq -0,964 + 1,80 \cdot K_M - 0,40^2 \cdot K_M^2 + \frac{0,023}{v_{MCi}}. \quad (6)$$

Абсцисса центра масс a_y трактора с продольной базой L , высотой линии тяги h_{KP} , радиусом задних $r_{\partial K}$ и передних $r_{\partial n}$ колес для оптимальной нагруженности передних колес $\lambda_{PP} = Y_{PP}/G_{\mathcal{E}} = 0,30 - 0,35$ при номинальной тяговой нагрузке P_{KPH} на операциях почвообработки всех установленных групп определялась из условия

$$a_y \geq \lambda_{PP} \cdot L + h_{KP} \cdot \varphi_{KPH} + 0,5f(r_{\partial n} + r_{\partial K}). \quad (7)$$

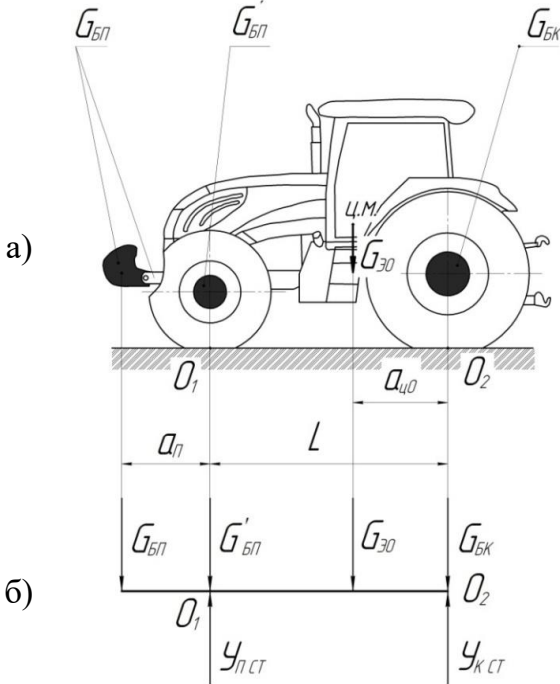


Рисунок 3 – Схема балластирования (а) и определения массы переднего и заднего балластов (б) трактора 4К4а: $G_{БП}$ – передний балласт; $G'_{БП}$ – груз передних колес; $G_{БК}$ – груз задних колес

Полная масса съемного балласта для трактора базовой комплектации с минимальной транспортировочной массой брутто $m_{\mathcal{E}0} \cong m_{\mathcal{E}3}^*$ на операциях первой и второй групп m_{Bi} рассчитывалась как

$$\begin{cases} m_{B1}^* = m_{Bmax} = m_{\mathcal{E}1}^* - m_{\mathcal{E}0}; \\ m_{B2}^* = m_{\mathcal{E}2} - m_{\mathcal{E}0}. \end{cases} \quad (8)$$

Общая схема балластирования трактора базовой комплектации с эксплуатационным весом $G_{БЭ} = G_{\mathcal{E}0}$, продольной базой L и абсциссой центра масс a_{y0} съемными грузами, установленными впереди остова $G_{БП}$, на дисках передних $G'_{БП}$ и задних $G_{БК}$ колес, представлена на рисунке 3. Массы передних $m_{БП}$, $m'_{БП}$ и заднего $m_{БК}$ балластов для получения рекомендуемого (оптимального*) распределения веса трактора в статике определялись решением уравнений моментов относительно осей передних O_1 и задних O_2 колес

$$\begin{cases} Y_{ПСТ} = [G_{БП} \cdot (L + a_{PI}) + G'_{БП} \cdot L + G_{\mathcal{E}0} \cdot a_{y0}] / L; \\ Y_{KCT} = [G_{\mathcal{E}0} \cdot (L - a_{y0}) - G_{БП} \cdot a_{PI} + G_{БК} \cdot L] / L. \end{cases} \quad (9)$$

Обозначив относительные величины абсцисс центра масс трактора базовой и рабочей комплектаций как $A_y = a_y/L$, $A_{y0} = a_{y0}/L$ и переднего балласта $A_{PI} = (L + a_{PI})/L$, получили выражения для расчета оптимальных значений массы $m_{БП}$ и $m_{БК}$ балластов при $m'_{БП} = 0$:

$$\begin{cases} m_{БП}^* = (m_{\mathcal{E}}^* \cdot A_y - m_{\mathcal{E}0} \cdot A_{y0}) / A_{PI}; \\ m_{БК}^* = (m_{\mathcal{E}}^* - m_{\mathcal{E}0}) - (m_{\mathcal{E}}^* \cdot A_y - m_{\mathcal{E}0} \cdot A_{y0}) / A_{PI}. \end{cases} \quad (10)$$

При этом абсцисса центра масс A_y в номинальном тяговом режиме и заданном значении λ_{PP}

$$A_{ц}^* \geq \lambda_{ПР} + [h_{КР} \cdot \varphi_{КРН} + f(r_{\partial n} + r_{\partial k}) \cdot 0,5]/L. \quad (11)$$

Третий уровень адаптации связан с конкретизацией состава и режимов работы почвообрабатывающего агрегата на базе энергомашины с оптимальными массоэнергетическими параметрами $(N_{еэ}/m_{эi})^*$. Он включает решение задач оптимизации целостной системы (МТА) с учетом взаимосвязей её подсистем между собой и окружающей средой на режиме рабочего хода.

Критериями ресурсосберегающего использования агрегата служит сменная производительность $\Pi_i \rightarrow \max$ и удельные топливные затраты $g_{wi} \rightarrow \min$. Выходными параметрами являются оптимальная ширина захвата МТА B_{Pi}^* и класс длины гона l_c^* , при котором достигается W_i^* :

$$\begin{cases} W_i = (\xi_N^* \cdot N_{еэ}) \cdot \eta_{TH}/K_{0i} \cdot \mu_{Ki} \geq W_i^*; \\ B_{Pi} = W_i^*/V_{Hi}^*. \end{cases} \quad (12)$$

Алгоритм оптимизации скоростного режима, параметров колесного 4К4а трактора и агрегата для зональных технологий почвообработки при установленных значениях коэффициентов $a, b, d, f, v_{MC}, K_0, \Delta K, \eta_{TP} = \text{const}$ и $\eta_T = \text{idem}$ на указанных выше основных режимах работы, известных величинах $m_{э0}, L, a_{ц0}, a_{П}$ по технической характеристике трактора: расчет в диапазоне от 2,0 до 4,0 м/с $\mu_K = 1 + \Delta K \cdot (V^2 - V_0^2)$, $E_K = \mu_K/\eta_T$, $K_{П} = V/\mu_K$, $K_{ЕП} = E_K/K_{П}$; определение $V_{\max}^*$ при $K_{П} \rightarrow \max$, $V_{\min}^*$ при $K_{ЕП} \rightarrow \min$; V_{opt}^* из условия $K_{ЕП}/K_{П} \rightarrow \min$, $V_H^* \approx 0,5 \cdot (V_{opt}^* + V_{\max}^*)$; определение зависимостей $\eta_T, \delta = f(\varphi_{КР})$ в интервале буксования задних колес от 7 до 20 % по (3); установление $\varphi_{КРНi}$ и определение соответствующих им значений η_{THi} и $m_{y\partial}^*$ для разных групп операций по (4); расчет ξ_N^* по (6), $m_{эi}^*$ и $P_{КРНi}$ по (5) при скорости V_{Hi}^* ; определение $a_{цi}$ и $A_{цi}^*$ по (7) и (11) при заданной $\lambda_{ПР}$; расчет $Y_{ПСТi}$ и $Y_{КСТi}$ по (9); определение массы полного m_B^* , переднего $m_{БПi}^*$ и заднего $m_{БКi}^*$ балластов по (8) и (10); определение ширины захвата агрегата B_{Pi} и типоразмеров мощности тракторов для превалирующих классов длины гона l_c' по (12).

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований» представлены программа, объекты, параметрические модели и методы стендовых, полевых и производственных испытаний.

На первом этапе исследований выполнена статистическая оценка скоростных режимов работы и характеристик $(K_0, \Delta K)$ почвообрабатывающих агрегатов разного технологического назначения, по результатам которой определялись номинальные значения их рабочей скорости.

При снятии характеристик по подаче топлива дизелей Д-245 и Д-260.С2 использована лабораторная установка на базе обкаточно-тормозного стенда КИ-5540М мощностью 110 кВт.

Лабораторно-полевые и производственные испытания трактора New Holland Т8.390 разной комплектации и степени балластирования в составе агрегатов (New Holland Т8.390 + БДМ8-4П и New Holland Т8.390 + Landmaster 9800) проводились для оценки влияния параметров-адаптеров на показатели эффективности их использования в зональных технологиях глубокой безотвальной и поверхностной обработки почвы.

Достоверность экспериментальных данных оценивали методами математической статистики с привлечением современных программных средств.

Расчеты и построение графиков осуществляли с помощью приложений Microsoft office Excel для Windows XP и КОМПАС-3D.

В четвертой главе «Результаты исследования эффективности адаптации колесных тракторов и агрегатов к зональным технологиям почвообработки» установлены рациональные тягово-скоростные диапазоны использования, параметры тракторов 4К4а и агрегатов для зональных технологий основной обработки почвы.

Результаты моделирования позволили получить зависимости (рисунок 4) эквивалент производительности, удельных энергозатрат $K_{П}$, $K_{ЕП}$, $K_E = f(V, \Delta K)$ и уравнения регрессии для колесного трактора 4К4а на одинарных колесах при $\eta_T = 0,62 - 0,63$ следующего вида:

$$\begin{cases} K_{П} = 1,081 \cdot V - 0,714 \cdot \Delta K - 0,112 \cdot V^2 + 25,491 \cdot \Delta K^2 - 3,798 \cdot V \cdot \Delta K \\ K_{ЕП} = 1,858 \cdot V - 24,057 \cdot \Delta K + 0,235 \cdot V^2 + 27,018 \cdot \Delta K^2 + 10,936 \cdot V \cdot \Delta K. \\ K_E = 1,951 \cdot V - 27,341 \cdot \Delta K + 0,231 \cdot V^2 + 48,300 \cdot \Delta K^2 + 10,100 \cdot V \cdot \Delta K \end{cases} \quad (13)$$

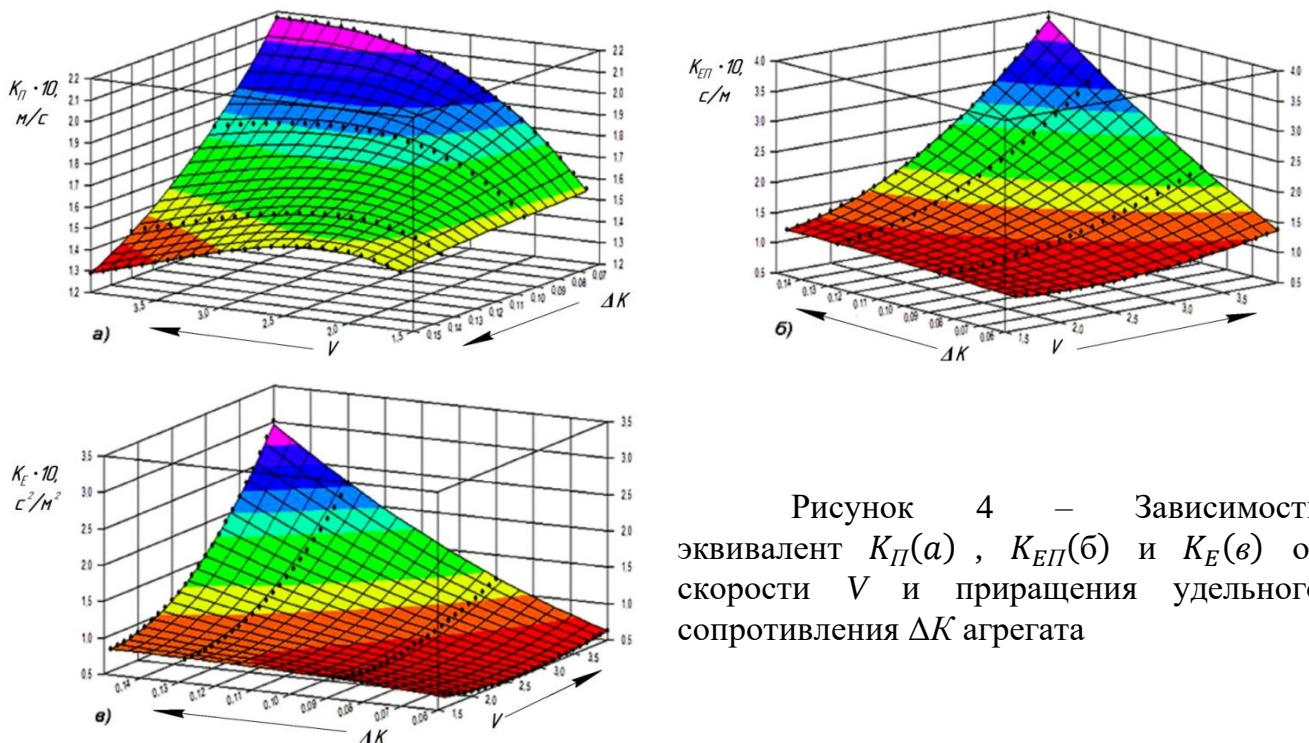


Рисунок 4 – Зависимости эквивалент $K_{П}(a)$, $K_{ЕП}(б)$ и $K_E(в)$ от скорости V и приращения удельного сопротивления ΔK агрегата

При этом установлены рациональные диапазоны и номинальные значения скорости рабочего хода для родственных операций разных групп (таблица 1) с учетом указанных критериев.

Таблица 1 – Рациональные диапазоны рабочей скорости агрегатов для зональных технологий основной обработки почвы

Группа родственных операций	$\Delta \bar{K}$, c^2/m^2	V_{max} , м/с	V_{opt} , м/с	V_H , м/с	$K_{П}^o = \frac{K_{ПН}}{K_{Пmax}}$	$K_{ЕП}^o = \frac{K_{ЕПН}}{K_{ЕПmin}}$
1	0,13	2,40	2,00	2,20	0,996	1,14
2	0,09	3,00	2,30	2,65	0,991	1,09
3	0,06	3,83	2,83	3,33	0,990	1,09

По результатам стендовых и лабораторно-полевых испытаний определены уравнения взаимосвязи эффективной мощности и расхода топлива в условиях нагрузочной характеристики:

$$Ne^0 = \frac{Ne}{Ne_э} = \frac{(x - a_0)}{(1 - a_0)}, \quad (14)$$

где $X = \frac{G_T}{G_{TH}}$; $a_0 = \frac{G_{Tx}}{G_{TH}}$ – соотношения расхода топлива при частичной нагрузке (G_T), холостом ходу (G_{Tx}) и номинального (G_{TH}) при n_H .

Использование разработанных моделей, алгоритма и экспериментальных зависимостей $\eta_T, \delta = f(\varphi_{KP})$ позволило обосновать оптимальные значения удельной массы $m_{y\delta}^*$ тракторов 4К4а на одинарных и сдвоенных колесах для совокупности разных групп родственных операций основной обработки почвы (рисунок 5, таблица 2).

Для определения степени рационального балластирования тракторов по результатам экспериментов разработана номограмма (рисунок 6).

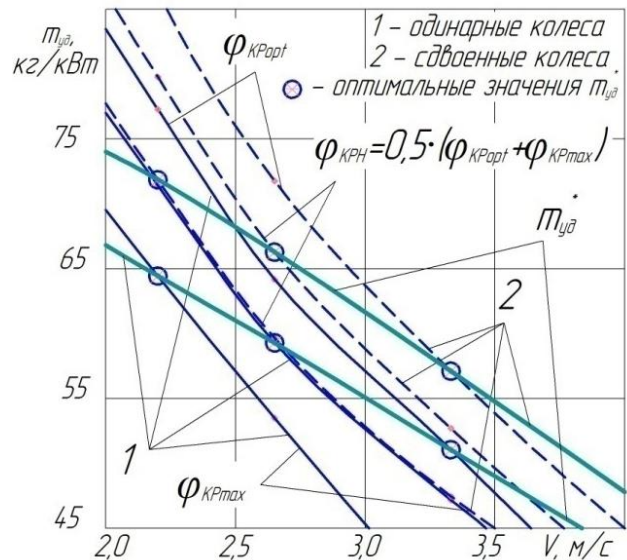


Рисунок 5 – Влияние скоростного режима работы на $m_{y\delta}^*$ трактора

Таблица 2 – Оптимальные значения φ_{KPH}^* и $m_{y\delta}^*$ для операций основной обработки почвы

Группа операций	V_H^* , м/с	Одинарные колеса			Сдвоенные колеса		
		φ_{KPH}^* / δ	η_{TH}	$m_{y\delta}^*$, кг/кВт	φ_{KPH}^* / δ	η_{TH}	$m_{y\delta}^*$, кг/кВт
1	2,20	0,45 / 0,150	0,626	64,45	0,45 / 0,121	0,697	71,88
2	2,65	0,41 / 0,126	0,633	59,31	0,41 / 0,101	0,706	66,19
3	3,33	0,38 / 0,111	0,634	51,04	0,38 / 0,088	0,709	57,08

Порядок пользования номограммой поясним на примере балластирования трактора New Holland T8.390 с одинарными колесами при выполнении операций почвообработки второй группы. При известной мощности тракторного дизеля $Ne_э = 250 \text{ кВт}$ (т. А) и $K_M = 1,40$ (т. a_4) определяют в IV квадранте $(\xi_N^* \cdot Ne_э) = 250,50 \text{ кВт}$ (т. A_4). Проведя через эту точку прямую, параллельную оси ординат до пересечения с линиями $m_{y\delta 2}^*$ (Iк) и $m_{y\delta 0}$, получают т. a_1 и т. a_{10} . На пересечения прямых, параллельных оси абсцисс из указанных точек с ординатой (т. A_1 и т. A_{10}), определяют значения эксплуатационных масс $m_{э2}^* = 14,86 \text{ т}$ и $m_{э0} = 12,76 \text{ т}$ ($m_{Б2} = m_{э2}^* - m_{э0} = 14,86 - 12,76 = 2,10 \text{ т}$) трактора. Продлив

указанные прямые во II квадранте до пересечения с линиями $A_u = 0,47$ и $A_{u0} = 0,40$ (т. a_2 и т. a_{2_0}), и проведя из этих точек параллельные оси ординат линии до пересечения с осью абсцисс находят значения $m_{II}^* = m_{\Sigma}^* \cdot A_u = 14,86 \cdot 0,47 = 6,9 \text{ т}$ (т. A_2) и $m_{II_0}^* = m_{\Sigma_0}^* \cdot A_{u0} = 12,76 \cdot 0,40 = 5,1 \text{ т}$ (т. A_{2_0}). Далее, продлив ординаты из указанных точек до пересечения в III квадранте с линией $m_B = f(A_{II})$ при заданной величине $A_{II} = 1,60$ (т. a_3 и т. A_{3_0}) и проведя из этих точек параллельные оси абсцисс линии до пересечения с ординатой (т. A_3 и т. A_{3_0}), определяют значения $m_{BII}^* = (A_3 - A_{3_0}) = (4,36 - -3,19) = 1,17 \text{ т}$ и $m_{BK}^* = m_B^* - m_{BII}^* = 2,10 - 1,17 = 0,93 \text{ т}$.

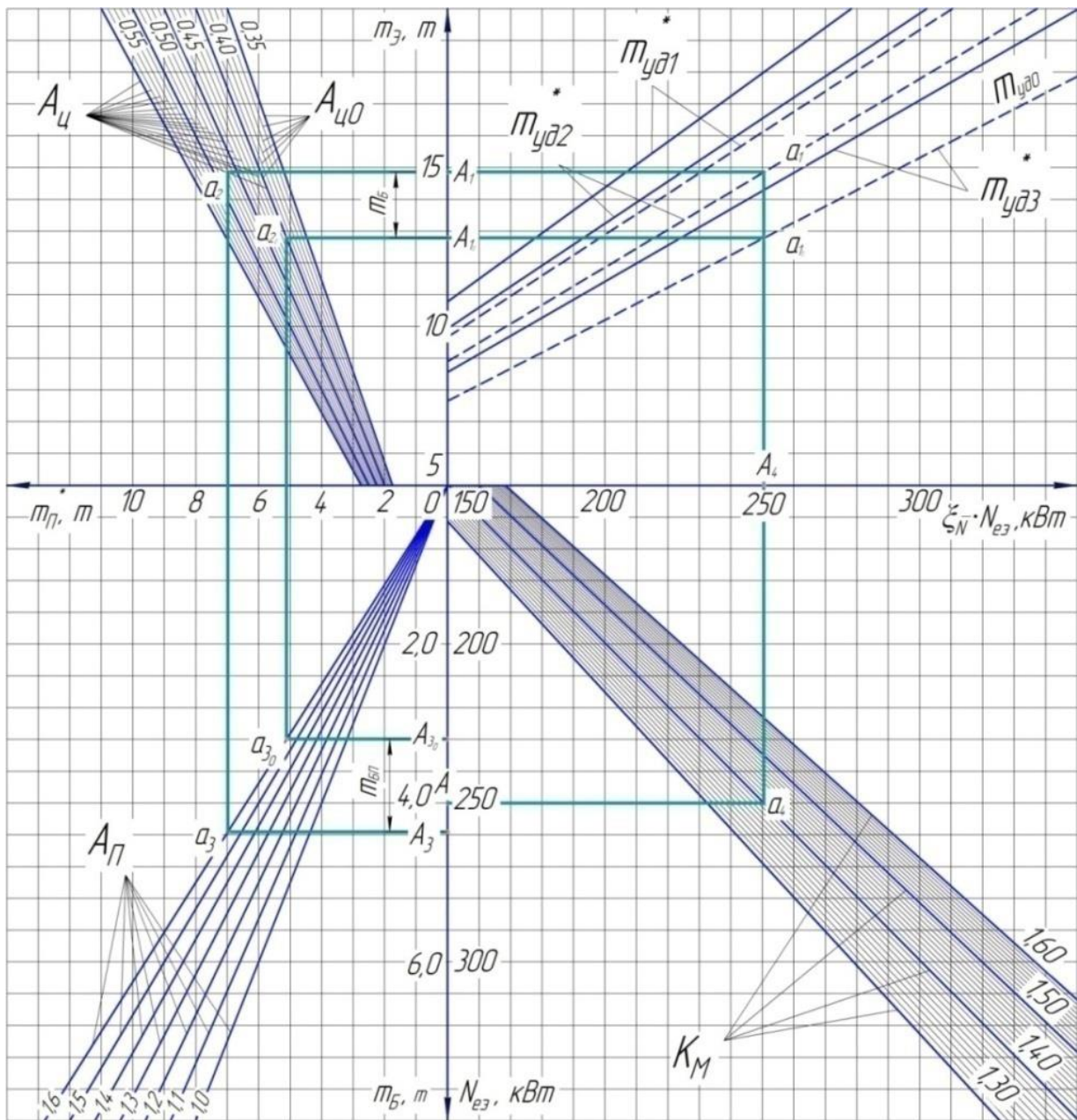


Рисунок 6— Номограмма для определения массы балластных грузов при использовании колесных 4К4а тракторов:

----- - на одинарных колесах; ————— - на сдвоенных колесах

Результаты производственных испытаний показали, что трактор New Holland T8.390 базовой комплектации ($m_{\text{ЭЗ}}^* = 12,75 \text{ т}$) в агрегате с культиватором Landmaster 9800 наиболее эффективен на рабочей скорости $V \geq 2,9 - 3,0 \text{ м/с}$, поскольку используется при полной загрузке двигателя в режиме постоянной мощности. Балластирование трактора ($m_{\text{Э1}}^* = 16,25 \text{ т}$) снижает производительность агрегата $W^0 = W_3/W_1$ на 2,3 % при одинаковых удельных топливных затратах $g_W^0 = g_{W3}/g_{W1}$ (рисунок 7,а).

Сдвигание задних и передних колес трактора без съемного балласта ($m_{\text{ЭЗ/2}}^* = 14,35 \text{ т}$) в диапазоне рабочих скоростей приводит к снижению буксования на 3–4 % и коэффициента загрузки от 2,3 до 9,3 %. Производительность агрегата возрастает от 2,1 до 7,4 % при снижении топливных затрат на 8,0–9,2 % (рисунок 7,б). Балластирование трактора ($m_{\text{Э1/2}}^* = 17,93 \text{ т}$) повышает производительность агрегата до 2,0 % при возрастании топливных затрат на 2,0–5,5 % в скоростном диапазоне от 2,03 до 3,07 м/с. При скорости $V \geq 3,07 \text{ м/с}$ двигатель выходит на режим постоянной мощности (11-я передача) и эффективность трактора с полным балластом ниже на 1–2 % по указанным показателям, чем у трактора без балласта.

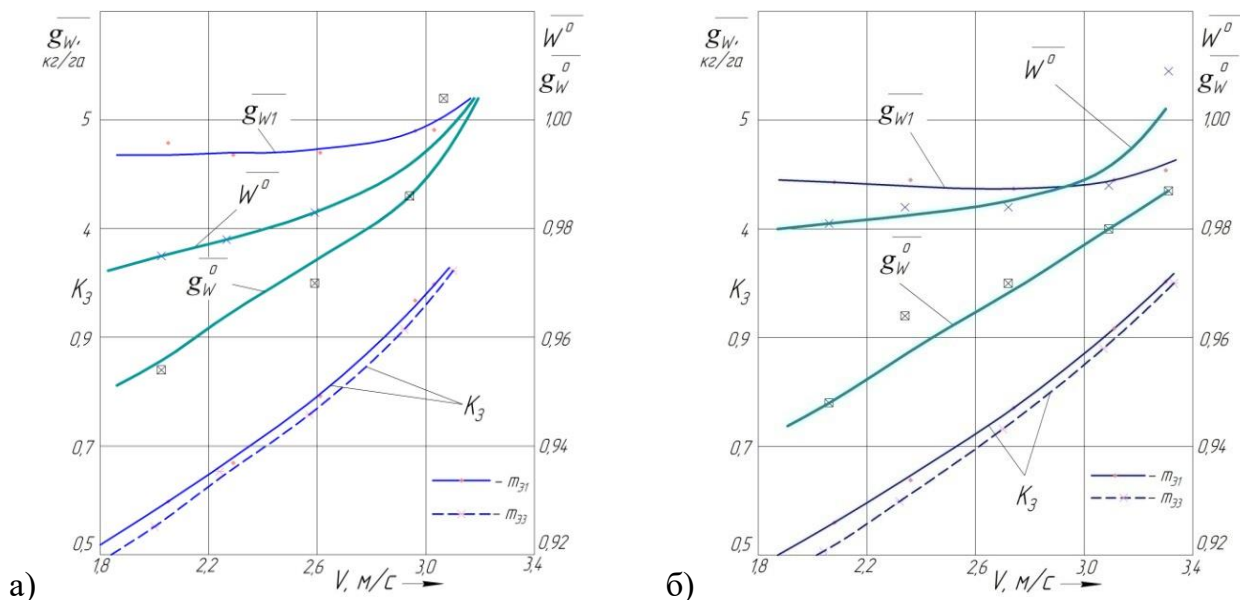


Рисунок 7 – Показатели производительности и топливной экономичности почвообрабатывающего агрегата (New Holland T8.390 + Landmaster 9800): а – одинарные колеса; б – сдвоенные колеса

Показатели агрегата (New Holland T8.390 + БДМ 8-4П) на поверхностной обработке почвы имеют аналогичные зависимости от рабочей скорости и комплектации трактора. При частичной загрузке двигателя в скоростном диапазоне от 2,03 до 3,0 м/с по производительности наиболее эффективен трактор на сдвоенных колесах и полном балластировании. Топливные затраты при этом выше на 2,4–3,4 %, чем у трактора без балласта. На рабочей скорости $V > 3,0 \text{ м/с}$ по показателям производительности и топливных затрат более эффективен трактор без балласта. На глубоком дисковании ($h = 0,16 - 0,18 \text{ м}$) в скоростном диапазоне от 1,98 до 2,65 м/с производительность на 1,6–2,3 % выше с балластированным трактором при одинаковых топливных затратах.

Рациональные эксплуатационные параметры трактора 4К4а при $l_z = 600 - 1000 \text{ м}$, с учетом занятости по времени на операциях разных групп, составляют в среднем $N_{ez}^* = 200 - 250 \text{ кВт/м}$; $m_{\Sigma 1K}^* = 10,2 - 15,0 \text{ т}$ и $m_{\Sigma 2K}^* = 11,5 - 17,8 \text{ т}$, что соответствует 5–6 тяговым классам.

Для выбора оптимального значения ширины захвата рабочей машины или агрегата особенного секционного типа следует руководствоваться удельными показателями $N_{y\partial} = N_{ez}/B_P, \text{ кВт/м}$, приведенными в диссертации.

Экономическая эффективность системы адаптации энергонасыщенного колесного 4К4а трактора New Holland Т8.390 к природно-производственным условиям региона, включающей оптимизацию тягово-скоростных диапазонов использования, рациональное балластирование и оснащение сдвоенными колесами от внедрения составит 212 тыс. руб./год на один трактор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам анализа основных тенденций развития, рынка и использования обоснована структура системной адаптации энергонасыщенных колесных тракторов к ресурсосберегающим технологиям почвообработки, включающая поэтапную оптимизацию тягово-скоростных режимов работы, массоэнергетических параметров и состава агрегатов на их базе.

2. Сформированные с обоснованными параметрами–адаптерами и критериями ресурсосбережения математические модели позволили реализовать алгоритм оптимизации тягово-скоростных режимов и эксплуатационных параметров колесного 4К4а трактора при использовании в составе почвообрабатывающих агрегатов разного технологического назначения.

3. Установленные взаимосвязи и закономерности формирования энергетических и топливных показателей при изменении регулируемых до работы и управляемых в процессе рабочего хода параметров–адаптеров позволили обосновать основные принципы и методы оценки эффективности адаптации колесного трактора к условиям режима рабочего хода почвообрабатывающего агрегата с использованием информации бортовой компьютерной системы.

4. По результатам статистической оценки характеристик удельного сопротивления почвообрабатывающих машин-орудий и экспериментов подтверждены основные положения теоретического анализа и обоснованы:

- номинальные значения и допустимые интервалы рабочей скорости агрегатов для операций почвообработки трех установленных групп – $V_{H1}^* = 2,20 \pm 0,20$; $V_{H2}^* = 2,65 \pm 0,35$; $V_{H3}^* = 3,30 \pm 0,50 \text{ м/с}$ – с рациональными тяговыми диапазонами использования колесных улучшенной классической компоновки тракторов разной комплектации $\varphi_{KP} = 0,38 - 0,45$;

- оптимальные значения и интервалы изменения удельной массы трактора для операций почвообработки разных групп на одинарных $m_{y\partial 1K}^* = (51_3 - 65_1) \text{ кг/кВт}$ и сдвоенных $m_{y\partial 2K}^* = (57_3 - 72_1) \text{ кг/кВт}$ колесах с соответствующим распределением эксплуатационной массы по осям передних и задних колес $m_{II}^*/m_{\Sigma}^* = (0,40_3 - 0,50_1)$;

- номограммы рационального балластирования энергонасыщенных колесных 4К4а тракторов в составе почвообрабатывающих агрегатов разного технологического назначения.

5. Адаптацию энергонасыщенных колесных 4К4а тракторов разной комплектации (на одинарных и сдвоенных колесах) к технологиям почвообработки обеспечивают оптимизация загрузки двигателя с установленной характеристикой при обосновании тягово-скоростных режимов работы и комплектовании агрегатов; использование базовой комплектации (без или с частичным балластированием) при $m_{y\partial z}^* = 51 - 52 \text{ кг/кВт}$ в диапазоне рабочих скоростей от 3,0 до 3,6 м/с на операциях почвообработки третьей группы; рациональное размещение съемного балласта с удельной массой $m_{б\gamma\partial}^* = 7 - 13 \text{ кг/кВт}$ на операциях почвообработки второй и первой групп в диапазоне рабочих скоростей 2,0–3,0 м/с.

6. Эффективность системы адаптации почвообрабатывающих агрегатов на базе энергонасыщенных колесных 4К4а тракторов к природно-производственным условиям региона подтверждена разработанными рекомендациями по их балластированию и оснащению сдвоенными колесами обеспечивающими повышение производительности и снижение топливных затрат соответственно до 3,5 и 7,5 %.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Селиванов, Н.И. Моделирование скоростных режимов агрегатов и удельных показателей колесных тракторов на основной обработке почвы / Н.И. Селиванов, В.Н. Запрудский, Ю.Н. Макеева // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 1. – С. 81–89.
2. Селиванов, Н.И. Эксплуатационные параметры колесных тракторов для зональных технологий почвообработки / Н.И. Селиванов, Ю.Н. Макеева // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 2. – С. 56–63.
3. Селиванов, Н.И. Адаптация колесных тракторов к технологиям почвообработки / Н.И. Селиванов, В.Н. Макеева // Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс]. – 2015. № 1. – Режим доступа: [http:// www. Science-education.ru/ 121-19086](http://www.Science-education.ru/121-19086) (дата обращения: 15.05.2015).
4. Селиванов, Н.И. Балластирование колесных тракторов на обработке почвы / Н.И. Селиванов, Ю.Н. Макеева // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 5. – С. 77–81.
5. Селиванов, Н.И. Эффективность использования колесных тракторов в технологиях почвообработки / Н.И. Селиванов, Ю.Н. Макеева // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 6. – С. 49–57.
6. Селиванов, Н.И. Структура экспериментальных исследований адаптации колесных 4К4а тракторов к технологиям почвообработки / Н.И. Селиванов, Ю.Н. Макеева // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 9. – С. 113–119.
7. Селиванов, Н.И. Удельная материалоемкость колесных тракторов при балластировании для технологий почвообработки [Текст] / Н.И. Селиванов, Ю.Н. Макеева // Вестник КрасГАУ. – Красноярск, – 2015. - № 10. – С. 65–70
8. Селиванов, Н.И. Рациональные типоразмеры колесных тракторов и агрегатов для зональных технологий почвообработки / Н.И. Селиванов, В.В. Матюшев, В.Н. Запрудский, Ю.Н. Макеева // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2015. – № 4. С. 84–89.

9. Селиванов, Н.И. Техническая оснащенность агропромышленного комплекса Красноярского края / Н.И. Селиванов, Ю.Н. Макеева, Ю.В. Косикина // Вестник КрасГАУ. – 2016. – № 1. – С. 52–58.
10. Запрудский, В.Н. Оценка эффективности использования колесных тракторов высокой мощности на основной обработке почвы / В.Н. Запрудский, Ю.Н. Макеева // Вестник КрасГАУ. – 2016. – № 5. – С. 117–122.
11. Селиванов, Н.И. Рациональное использование энергонасыщенных колесных тракторов в технологиях почвообработки / Н.И. Селиванов, Ю.Н. Макеева // Вестник КрасГАУ. – 2017. – № 3. – С. 58–65

в других изданиях

12. Селиванов, Н.И. Параметры колесных тракторов для зональных технологий почвообработки / Н.И. Селиванов, Ю.Н. Макеева // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития. Часть 2. Наука: опыт, проблемы, перспективы развития: мат-лы XIII Международной научно-практической конференции (Красноярск, 23–24 апреля 2014 г.) / Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2014. – С. 44–46.
13. Селиванов, Н.И. Тенденции развития и использования мощных тракторов / Н.И. Селиванов, В.Н. Запрудский, Ю.Н. Макеева // Проблемы развития АПК Саяно-Алтая: мат-лы Международной научно-практической конференции. – Абакан, 2015. – С. 153–157.
14. Макеева, Ю.Н. Регулирование степени балластирования колесных тракторов на обработке почвы / Ю.Н. Макеева // Инновационные тенденции развития Российской науки: мат-лы VIII Международной научно-практической конференции молодых ученых / Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2015. – С. 163–164.
15. Селиванов, Н.И. Удельная материалоемкость колесных тракторов / Н.И. Селиванов, В.Н. Запрудский, Ю.Н. Макеева // Ресурсосберегающие технологии механизации сельского хозяйства: прил. к «Вестнику КрасГАУ» / Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2015. – Вып. 10. – С. 17–19.
16. Макеева, Ю.Н. Формирование тракторного парка в АПК Красноярского края / Макеева Ю.Н. // Эпоха науки. – 2015. – №4. С.336-339. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eraofscience.com>.
17. Косикина, Ю.В. Сертификация и оценка технологического уровня сельскохозяйственных тракторов / Ю.В. Косикина, Ю.Н. Макеева // «Инновационные тенденции развития российской науки»: мат-лы IX Международной научно-практической конференции молодых ученых (Красноярск, 22 – 23 марта 2016 г.) / Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2016. – С. 179–183.
18. Макеева, Ю.Н. Структура и обновление тракторного парка в сельском хозяйстве Красноярского края / Ю.Н. Макеева, Ю.В. Косикина, С.В. Самохвалов // Инновационная наука: прошлое, настоящее, будущее: мат-лы Международной научно-практической конференции (Уфа, 1 апреля 2016г.). – Уфа: Аэтерна, 2016. – Ч.2. – С. 56–59.

19. Макеева, Ю.Н. Тенденции развития энергонасыщенных колесных тракторов общего назначения / Ю.Н. Макеева // Эпоха науки. – 2016. – № 8. С. 173–178. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eraofscience.com>.

20. Макеева, Ю.Н. Режимы работы и параметры колесных тракторов для технологий основной обработки почвы / Ю.Н. Макеева // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития. Часть 2. Наука: опыт, проблемы, перспективы развития: мат-лы Международной научно-практической конференции (Красноярск, 18–20 апреля 2017 г.) / Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2017. – С. 36–39.