

На правах рукописи



АЛЯБЬЕВ Вадим Анатольевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ТРАКТОРА ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ
ЗАДАННОГО РЕСУРСА ХОДОВОГО АППАРАТА**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Троицк – 2017

Работа выполнена на кафедре «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Бердов Евгений Иванович

Официальные оппоненты: **Астафьев Владимир Леонидович**,
доктор технических наук, профессор,
директор Костанайского филиала
Казахского НИИ механизации
и электрификации сельского хозяйства

Гайнуллин Ильшат Анварович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры теории и практики
управления образованием
ГАУ ДПО «Институт развития образования
Республики Башкортостан»


Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет
(Национальный исследовательский
университет)»

Защита состоится «23» июня 2017 г., в 09.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.066.02 на базе ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 75.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ: <http://юургау.рф>.

Автореферат разослан «__» мая 2017 г. и размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки России <http://vak.ed.gov.ru> и на сайте ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ: <http://юургау.рф>.

Ученый секретарь
диссертационного
совета



Запевалов
Михаил Вениаминович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. По имеющимся данным, за полный срок эксплуатации тракторных агрегатов (ТА) в сфере агропромышленного комплекса (АПК) России суммарные потери от простоев на ремонтах и технических обслуживаниях машин составляют в среднем 21...28% от их балансовой цены. Обусловленные, наряду с другими факторами, и недостаточной надежностью, эти потери приводят к снижению эффективности использования техники. Поэтому поиск путей снижения потерь от недоиспользования потенциальных возможностей ТА и тем самым повышения их эффективности является важной задачей, имеющей существенное значение для развития АПК страны.

Для снижения экологической нагрузки на плодородный слой почвы полевые работы предпочтительнее выполнять МТА в составе гусеничных тракторов с орудиями, использовать нулевые технологии обработки «No-Till» и т. п. Гусеничный движитель, в сравнении с колесным, обеспечивает меньшее удельное давление на почву (0,03...0,07 МПа) и большие тягово-сцепные свойства, что позволяет существенно уменьшить буксование и повысить тяговый КПД трактора. При максимальном наборе сельскохозяйственных полевых работ на почвах с минимальным содержанием абразивных частиц ходовой аппарат (ХА) гусеничного трактора может работать более двух календарных лет, однако, как правило, в зимний период трактор недоиспользуется. Повысить эффективность использования гусеничных тракторов в сфере АПК можно за счет их эксплуатации в межсезонный период для выполнения землеройных работ (например, с бульдозерным оборудованием) при строительстве различных сооружений, обслуживании дорог и т. п., т. е. как тракторов двойного назначения (ТДН).

Опыт эксплуатации гусеничных машин в АПК показывает, что на ходовую систему приходится 39...43% от всех отказов трактора. На основе анализа интегральных эксплуатационных затрат доказано, что для обеспечения эффективной работы гусеничного трактора ресурс его ходового аппарата должен составлять не менее 37...40% ресурса трактора, т.е. не менее 3,7...3,9 тыс. мото-ч.

Таким образом, повышение ресурса ХА гусеничного ТДН при его использовании в течение всего календарного года является

актуальной задачей. Одним из путей ее решения является обеспечение равномерного распределения вертикальных нагрузок на опорную часть ХА трактора при выполнении им различных технологических операций в агрегате с сельскохозяйственными и дорожно-строительными машинами и орудиями. Кроме того, перспективным направлением является выбор рациональной схемы загрузки при эксплуатации ТА в зависимости от почвенно-климатических условий, вида работы и вариантов агрегатирования.

Степень разработанности темы. Анализ известных научных исследований в области повышения эффективности использования гусеничных тракторов показал, что в них практически отсутствуют сведения, посвященные исследованиям взаимосвязей показателей надежности элементов ходового аппарата гусеничного трактора, в том числе ТДН, с видом технологической операции и условиями эксплуатации, что не дает возможности качественного планирования рациональной загрузки МТА в течение года и обеспечения его эффективной безотказной работы. Данное обстоятельство послужило основанием для выбора темы и цели исследования.

Цель исследования: повышение эффективности использования трактора двойного назначения обеспечением заданного ресурса ходового аппарата.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи исследования:

- установить основные причины снижения ресурса ХА гусеничного ТДН и обосновать пути его увеличения до заданного уровня;
- разработать математическую модель процесса изменения остаточного ресурса ХА ТДН для различных условий работы и вариантов агрегатирования;
- разработать методику планирования рациональной эксплуатационной загрузки трактора для обеспечения заданного (экономически целесообразного) ресурса ХА и обосновать параметры технических средств, способствующих этому;
- провести экспериментальные исследования и определить показатели надежности и ресурс ХА гусеничных ТДН, оценить адекватность предложенных теоретических положений реальному процессу;
- определить эффективность обеспечения требуемого ресурса ХА ТДН.

Объект исследования: технологический процесс работы ТА на различных видах работ с определением показателей надежности его ХА при различных вариантах загрузки базового трактора.

Научная гипотеза: повышение эффективности использования гусеничного ТДН при круглогодичной эксплуатации с сельскохозяйственными и дорожно-строительными машинами и орудиями возможно путем снижения неравномерности распределения вертикальных нагрузок на опорную часть ХА трактора, а также выбором рациональных схем загрузки для каждого вида выполняемых работ.

Предмет исследования: закономерности изменения показателей надежности ХА ТДН во взаимосвязи с условиями эксплуатации и вариантами агрегатирования при выполнении наиболее вероятных технологических операций.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовали общенаучные и частные методы исследования, а также методы математического прогнозирования, моделирования и факторного анализа, совокупность которых соответствовала целям и задачам исследования. Основой проведения экспериментальных исследований являлись положения, изложенные в государственных стандартах, распространяющихся на испытания и эксплуатацию гусеничных тракторов, сбор и обработку информации о надежности тракторов и их систем, планирование экспериментов, определение нормальных давлений на опорную поверхность, проведение микрометража элементов ХА с последующей обработкой результатов с помощью регрессионного анализа.

Научная новизна: разработана методика расчета показателей надежности ХА ТДН для различных вариантов агрегатирования базового трактора и выполняемых технологических операций; получены математические модели работы ТДН для различных вариантов агрегатирования и условий работы; определены закономерности изменения показателей надежности элементов ХА ТДН при воздействии рабочих нагрузок; установлены основные факторы, вызывающие интенсивный износ элементов и узлов ХА; предложены решения, позволяющие нивелировать неравномерность распределения вертикальных нагрузок на опорную часть ХА при воздействии как крюковых, так и фронтальных нагрузок на остов трактора двойного назначения.

Практическая значимость работы: результаты исследования позволяют повысить эффективность использования ТДН в сфере

АПК за счет повышения ресурса ХА при выполнении основных технологических операций. Получены патент на полезную модель № 153663, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №№ 2014617557, 2015613551, 2015614706, 2015615327.

Реализация результатов исследования: теоретические разработки и результаты экспериментальных исследований использованы ООО «ГСКБ ЧТЗ» при проектировании новых образцов тракторной техники и модернизации серийных машин, а также в учебном процессе ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ при изучении дисциплины «Тракторы и автомобили».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждены и одобрены на НТК в ОАО «НИИ АТТ» (2010 г.), ЮУрГУ (2012 г.), ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ (2009–2016 гг.), БашГАУ (2016 г.), НТС Министерства сельского хозяйства Челябинской области (2016 г.).

На защиту выносятся: анализ режимов работы ТДН; математические модели работы ТДН; методика и программы расчета показателей надежности ХА ТДН для различных вариантов агрегатирования и условий работы; результаты экспериментальных исследований показателей надежности ХА ТДН в различных условиях эксплуатации; экономичная оценка эффективности работы ТДН при рекомендованных рациональных режимах нагружения ХА с использованием разработанных технических решений по нивелированию вертикальных нагрузок на опорную поверхность ХА.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обусловлена корректным использованием математического аппарата и адекватностью разработанных моделей. Достоверность научных результатов и положений подтверждена экспериментальными исследованиями в производственных условиях. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превосходит 7...11 %.

Публикации результатов исследований. По результатам исследований опубликовано 9 научных работ, в том числе 5 в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (192 наименования, в т. ч. 3 иностранных источника) и 30 приложений. Работа изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 37 иллюстраций и 40 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, показаны степень разработанности темы, цель, задачи, объект и предмет исследования, научная гипотеза, методика исследования, научная новизна и практическая значимость выполненной диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов исследования.

В **первой главе** «Состояние вопроса и задачи исследования» проведен анализ работы гусеничных тракторов с типичным агрегатированием, рассмотрены особенности тракторов двойного назначения. Показано, что при выполнении полевых и землеройных работ гусеничный трактор в сравнении с колесным аналогом имеет неоспоримые преимущества: низкое удельное давление на почву, высокий тяговый КПД, пониженный удельный расход топлива, более высокую производительность и т. п.

Анализ распределения наработки гусеничных сельскохозяйственных тракторов по видам работ показывает, что на выполнение основной и поверхностной обработки почвы приходится более 56% времени эксплуатации от годового объема работы МТА; на выполнение посевных и транспортных работ – 7,6 и 36,2% соответственно.

Для гусеничного трактора при выполнении землеройных работ на грунтах I–II категорий плотности, как свидетельствует анализ имеющихся материалов, наиболее вероятным является агрегатирование бульдозерным оборудованием – более 85% всех случаев.

Эффективность использования гусеничных тракторов в сфере АПК может быть существенно повышена за счет обеспечения возможности их агрегатирования как энергоемкими сельскохозяйственными (отвальные и чизельные плуги, тяжелые бороны и т. п.), так и землеройными орудиями (бульдозер, прицепной скрепер), т. е. широким применением тракторов двойного назначения.

При работе гусеничного трактора его движитель непосредственно взаимодействует с опорной поверхностью – почвой (грунтом), в которой нередко содержатся абразивные частицы, вызывающие интенсивный износ гусениц. Это обстоятельство, наряду с другими, предопределяет их низкую долговечность и надежность, что подтверждается объективными данными об отказах ХА в условиях эксплуатации

ТДН в Урало-Сибирской зоне: приходящиеся на гусеничные ленты отказы составляют 62...74% от всех отказов ХА. При этом срок службы гусеничных лент, как правило, составляет менее 2 тыс. мото-ч, что, учитывая относительно высокую стоимость комплекта новых гусениц (8...10% от стоимости нового трактора), делает эксплуатацию гусеничного трактора малоэффективной и малорентабельной.

Специфика использования гусеничных тракторов общего назначения при выполнении основных технологических операций и способы повышения эффективности их использования рассмотрены в работах А.П. Банника, В.И. Баловнева, Е.И. Бердова, В.В. Бледных, А.И. Брусенцева, Г.В. Веденяпина, Ю.А. Ветрова, Ю.В. Гинзбурга, А.Н. Зеленина, С.А. Иофинова, А.Г. Карлова, Ю.К. Киртбая, И.П. Ксеневича, Р.К. Кудайбергенова, Б.М. Куликова, В.Н. Кычева, М.И. Ляско, М.П. Сергеева, В.А. Скотникова, А.В. Старцева, О.Л. Уткина-Любовцева и др.

При этом публикаций, посвященных исследованию взаимосвязей вида работы, выполняемой МТА, с ресурсом ХА трактора, крайне мало. Комплексное решение задачи выбора рациональной схемы загрузки МТА на базе гусеничного ТДН в течение календарного года с целью достижения требуемого (или установленного) ресурса ХА на сегодняшний день отсутствует. Эти обстоятельства предопределили выбор темы диссертационной работы и позволили сформулировать задачи исследования.

Во второй главе *«Теоретические основы выбора режимов эксплуатационной загрузки машинно-тракторного агрегата на базе гусеничного трактора двойного назначения, определяющих ресурс его ходового аппарата»* проведен факторный анализ процессов изменения остаточного ресурса узлов и элементов ХА гусеничного трактора с различными вариантами агрегатирования и видов выполняемых работ.

Для оценки ресурса узлов и элементов ХА ТДН были проведены исследования на тракторах типа Т-170 (ЧТЗ), находящихся в подконтрольной эксплуатации в хозяйствах Челябинской и Тюменской областей. Полученные в результате обработки данные представлены в таблице 1. Установлено, что самым низконадежным элементом трактора являются гусеничные ленты, доля отказов которых составляет 62...74% от всех отказов ХА. При этом очевидно, что ресурс гусеничных лент определяет ресурс ХА и трактора в целом.

Таблица 1 – Средний ресурс элементов ХА тракторов Т-170М.03

Наименование составляющих ХА трактора элементов	Эксплуатация тракторов (с.-х./дор.-строит. работы), мото-ч	
	в Тюменской области	в Челябинской области
Гусеничные ленты (комплект)	2340/2200	2060/1940
Каток опорный	4460/4130	4220/3915
Ролик поддерживающий	≥ 6000	≥ 6000
Колесо направляющее	5400	5250
Колесо ведущее (звездочка)	4870/4650	4650/4440
Подвеска	≥ 6000	≥ 6000

С учетом относительно высокой стоимости гусеничных лент подсчитано, что за ресурс тракторного агрегата до первого капитального ремонта (10...12 тыс. мото-ч) общие затраты на приобретение новых комплектов гусеничных лент суммарно составят 40...49% от стоимости самого трактора. Таким образом, повышение ресурса гусеничных лент путем рациональной загрузки позволит не только увеличить ресурс ХА трактора, но и снизить затраты, связанные с поддержанием трактора в работоспособном состоянии и с потерями от невыполненной работы из-за простоев техники.

Полученные результаты исследования работы ТДН позволили определить, что на ресурс его ходового аппарата наибольшее влияние оказывают следующие факторы: тяговое усилие трактора; действительная скорость движения ТА; распределение нормальных нагрузок по длине опорной поверхности; почвенно-грунтовые условия. Методом факторного анализа установлено, что доминирующим фактором является тяговое усилие трактора, весомость которого составила 59...64%.

На основе имеющихся данных были получены зависимости остаточного ресурса $R_{\text{ост}}$ ХА ТА от его наработки t , позволяющие охарактеризовать функцию $R_{\text{ост}} = f(t)$ как унимодальную, выпуклую, квадратичную. В решаемой задаче для каждого вида тракторных работ на основе обработки данных подконтрольной эксплуатации были составлены уравнения нелинейной регрессии с указанием значений коэффициентов аппроксимации.

На рисунках 1 и 2 в качестве примера приведены зависимости, иллюстрирующие изменения остаточного ресурса $R_{\text{ост}}$ ХА тракторного агрегата во времени от видов выполняемых работ, построенные в соответствии с полученными уравнениями регрессии.

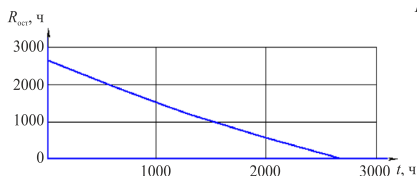


Рисунок 1 – Зависимость остаточного ресурса ($R_{\text{ост}}$) ХА от наработки (t) МТА, выполняющего зяблеву вспашку

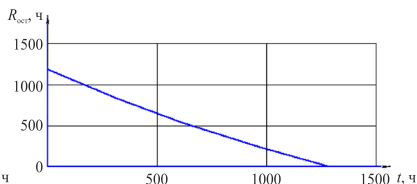


Рисунок 2 – Зависимость остаточного ресурса ($R_{\text{ост}}$) ХА от наработки (t) ТА, разрабатывающего тяжелые суглинки в летний период

Представленные математические характеристики могут быть также использованы для определения остаточного ресурса ХА любых типов тракторов.

Процессы изменения технического состояния системы описывали вероятностными методами. В этом случае остаточный ресурс $t_{\text{ост}}$ определяли как разность между средним $T_{\text{ср}}$ и фактически используемым $t_{\text{ф}}$ ресурсами ($t_{\text{ост}} = T_{\text{ср}} - t_{\text{ф}}$) и рассчитывали по формуле:

$$t_{\text{ост}} = t \cdot \left[\left(\frac{u_{\text{п}}}{u(t)} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right], \quad (1)$$

где $u_{\text{п}}$ – предельное отклонение параметра, обуславливающее потерю работоспособности системы;

$u(t)$ – установленное при контроле изменение параметра состояния системы в зависимости от наработки;

t – наработка системы к моменту контроля;

α – показатель степени, характеризующий темп изменения технического состояния системы.

Надежность составляющих ХА и трактора, характеризуемая такими свойствами, как ремонтпригодность, безотказность и дол-

говечность, определяется с учетом коэффициента технического использования:

$$K_{т.и} = \frac{K_n \cdot \sum_{i=1}^N T_i}{K_n \cdot \sum_{i=1}^N T_i + \sum_{i=1}^N t_{pi} + \sum_{i=1}^N t_{TOi}}, \quad (2)$$

где T_i – наработка i -го трактора, мото-ч;

t_{pi} – суммарная оперативная продолжительность текущих и капитальных ремонтов i -го трактора за период работы T , ч;

t_{TOi} – суммарная оперативная продолжительность технических обслуживаний i -го трактора за период работы T , ч;

K_n – коэффициент перевода моточаса в час, ч/мото-ч.

С целью повышения точности расчетов в известную формулу (2) нами были внесены изменения: расчет значений показателей, составляющих суммарную продолжительность всех видов ремонтов $\sum_{i=1}^N t_{pi}$ и технических обслуживаний $\sum_{i=1}^N t_{TOi}$, выполнялся в зависимости от математического ожидания числа отказов $\Omega(t)$, математического ожидания времени устранения отказа $M[t_b(t)]$, математического ожидания времени устранения сложных отказов $M(T_{к.р.})$, потребности в устранении сложных отказов $U(t)$ и затрат времени на проведение ТО.

Математические ожидания числа отказов и времени устранения отказа рассчитывали с учетом полученных нами экспериментальных зависимостей изменения параметра потока отказов $\omega(t)$ и среднего времени устранения отказа $t_b(t)$. Предложенная нами интерпретация законов изменения случайных величин – параметра потока отказов $\omega(t)$, среднего времени устранения отказа $t_b(t)$, среднего времени устранения сложных отказов $T_{к.р.}(t)$ и потребности в устранении сложных отказов $U(t)$ – должна обеспечить более точное вычисление значений коэффициента технического использования в каждый текущий момент времени эксплуатации. Последнее позволит уточнить среднюю квадратическую погрешность определения остаточного ресурса ХА ТА.

С учетом случайного характера изменений математического ожидания числа отказов $\Omega(t) = \sum_{i=1}^p \int_{t_{i-1}}^{t_i} \omega_i(t) dt$ и потребности в устранении сложных (в том числе ресурсных) отказов, определяемой из (3):

$$U(t) = \sum_1^n \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sum_1^n \sigma_i^2}} \cdot \int_0^t \exp \left\{ - \frac{\left[t - \left(T_{pi} + \sum_1^{n-1} K_{pi} \cdot T_{pi} \right) \right]^2}{2 \cdot \sum_1^n \sigma_i^2} \right\} dt, \quad (3)$$

где T_{pi} – средняя наработка (ресурс) между i -м и $(i - 1)$ -м сложными отказами;

K_{pi} – коэффициент восстановления ресурса после устранения i -го сложного отказа;

σ_i – среднее квадратическое отклонение суммарной наработки в i -м интервале;

p – число видов тракторных работ,

можно рассматривать коэффициент технического использования $K_{т.и}(t)$, характеризующий долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно эксплуатационного периода как случайную величину:

$$K_{т.и}(t) = \frac{K_n \cdot t}{K_n \cdot t + K_{ТО} \cdot t + M(T_{к.р}) \cdot U(t) + \Omega(t) \cdot M[t_b(t)]}, \quad (4)$$

где $K_{ТО}$ – коэффициент, учитывающий простои объекта на ТО;

$M(T_{к.р})$ – математическое ожидание времени устранения сложных, в том числе ресурсных, отказов;

$M[t_b(t)]$ – математическое ожидание времени устранения отказа.

Коэффициент технического использования, характеризующий работоспособное состояние ХА и трактора, может быть использован для определения изменения ресурса ХА в течение эксплуатации.

На основе анализа информации об отказах были получены аналитические зависимости изменения ресурса ХА трактора (ТА) во времени от типа почв (грунтов) и видов выполняемых на них работ. В результате обобщения полученных зависимостей разработана математическая модель изменения случайным образом комплексного показателя надежности $K_{т.и}(t)$, текущее значение которого позволяет определить остаточный ресурс ХА:

$$R_{\text{ост}}(t) = R_{\text{сп}} \cdot \left\{ 1 - \left[1 - K_{\text{т.и}}(t_1) \right] : \frac{K_{\text{п}} \cdot t}{K_{\text{п}} \cdot t + K_{\text{ТО}} \cdot t + M(T_{\text{к.р}}) \times \times U(t) + \Omega(t) \cdot M[t_{\text{б}}(t)]} \right\}^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{т.и}}(t_1)$ – коэффициент технического использования трактора в начальный момент времени;

α – показатель степени, характеризующий интенсивность изменения остаточного ресурса элементов ХА.

Предложенная математическая модель положена в основу метода, который обеспечивает заданный ресурс ХА ТДН в зависимости от вариантов агрегатирования и видов выполняемых работ.

В третьей главе «Методика проведения эксперимента. Анализ и обработка результатов исследований» изложены соответствующие методики по проведению эксперимента и обработке полученных результатов.

Физическими объектами исследования являются тракторы Т-170 с шестикатковой тележкой гусениц, агрегатированные сельскохозяйственными и землеройными орудиями.

Определение нормальных нагрузок в пределах длины опорной поверхности гусениц производили с помощью стандартных силоизмерительных датчиков типа С-20 ГОСТ 28836-90 кл. 0,6. Сигнал с датчика по экранированному кабелю передавался на измерительно-регистрационный комплекс.

Эффективность технических решений, позволяющих уменьшить пиковые нагрузки на крайние опорные катки трактора, определили методом сравнительных испытаний модернизированного трактора совместно с аналогом в идентичных условиях в соответствии с ГОСТ 7057-2001 и ГОСТ 10792-81.

План испытаний (подконтрольная эксплуатация вышеуказанных объектов с определением показателей надежности и ресурса ходовых аппаратов) составлен в соответствии с требованиями ГОСТ Р 27.403-2009 и РД 50-690-89, устанавливающими число объектов испытаний (тракторов) и порядок проведения испытаний.

Требуемый объем испытаний находили, исходя из вычисления оценок показателей надежности с заданной точностью (относительной ошибкой ε в оценке показателя надежности) и достоверностью (доверительной вероятностью q).

Для повышения точности оценок показателей применяли план $[NUN]$. Согласно принятому плану $[NUN]$, испытывают одновременно N объектов. Отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют. Испытания прекращают, когда число отказавших объектов достигло числа N . Для восстанавливаемых (ремонтируемых) объектов план определительных испытаний на надежность $[NUN]$ рассматривают применительно к предельным состояниям.

Предельные значения показателей, характеризующих наступление отказов, принимали в соответствии с нормативно-технической документацией. При обработке информации все отказы трактора систематизировали по принадлежности к какой-либо его системе, а также по группам сложности в соответствии с классификатором отказов тракторов.

В четвертой главе *«Экспериментальные исследования нагруженности и параметров надежности ходового аппарата трактора двойного назначения»* изложены основные результаты испытаний по определению вертикальных нагрузок на опорную часть ходового аппарата трактора, а также представлен анализ показателей надежности и ресурса ХА гусеничных ТДН типа Т-170М.03, прошедших подконтрольную эксплуатацию в сельскохозяйственных предприятиях Челябинской области.

Распределение отказов по системам (таблица 2) свидетельствует, что наименее надежной является ходовая система (39...43 % от всех отказов трактора).

В свою очередь, среди составляющих ходовую систему элементов менее надежным является гусеничная лента: на ее долю приходится 64...75% от всех отказов ХА (таблица 3).

Наиболее часто встречающимся, а значит, низконадежным и лимитирующим в конечном итоге ресурс ХА ТА является износ поверхности звена гусеничной ленты по высоте, а также износ крайних опорных катков по внешнему диаметру.

Таблица 2 – Распределение отказов по системам трактора

№ п/п	Регион эксплуатации	Экспериментальное распределение отказов по системам трактора, %					
		Двигатель и его системы	Трансмиссия	Ходовая система	Гидросистема	Электрооборудование	Кабина и элементы оперения
1	Красноармейский район	31,7	12,5	41,6	6,2	4,7	2,5
2	Сосновский район	30,8	15,9	39,3	8,2	3,9	1,4
3	Троицкий район	31,2	12,8	43,1	7,1	3,7	1,8

Таблица 3 – Средний ресурс элементов ХА тракторов Т-170М1.03-53

Наименование составляющих ХА трактора элементов	Средний ресурс составляющих ХА трактора, мото-ч		
	Красноармейский район	Сосновский район	Троицкий район
Гусеничные ленты (комплект)	2080/1990	2110/2020	2040/1950
Каток опорный:			
– крайний	3290/3010	3270/3040	3190/2990
– средний	5380/5120	5320/5160	5290/5170
Ролик поддерживающий	≥ 6000	≥ 6000	≥ 6000
Колесо направляющее	5580	5410	5420
Колесо ведущее (звездочка)	4620/4310	4580/4290	4560/4250
Подвеска	≥ 6000	≥ 6000	≥ 6000

Примечание: эксплуатация тракторов в Челябинской обл. (с.-х./дорож.-строит. работы).

На рисунках 3 и 4 в качестве примера приведены экспериментальные зависимости изменения износа (ΔU) ХА и его остаточного ресурса ($R_{ост}$) во времени в зависимости от видов и объемов выполняемых работ.

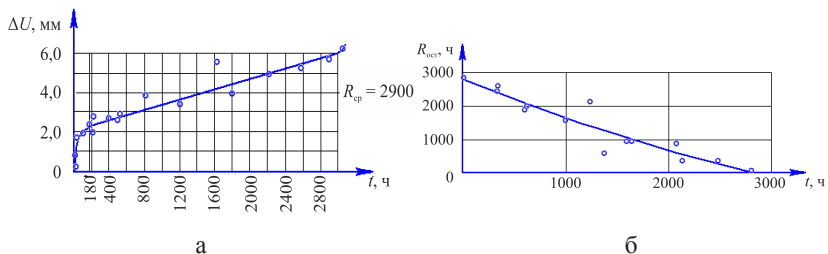


Рисунок 3 – Зависимости изменения износа (а) и остаточного ресурса (б) ХА от наработки МТА, выполняющего боронование почвы после посева зерновых культур на отвальном фоне (лето)

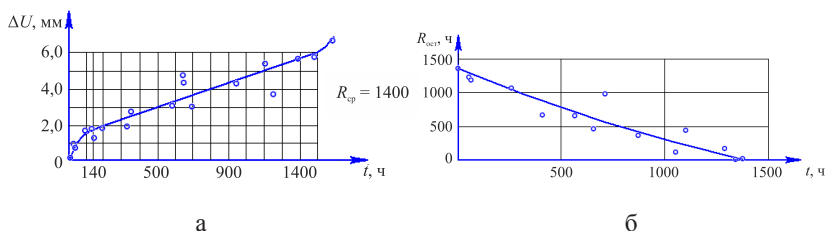


Рисунок 4 – Зависимости изменения износа (а) и остаточного ресурса (б) ХА от наработки ТА, разрабатывающего средние суглинки в летний период

В результате эксперимента были определены вертикальные нагрузки на опорную часть ХА трактора Т-170М.03. Установлено, что наиболее нагруженными являются крайние опорные катки как при работе с фронтальной (бульдозер), так и при работе с крюковой (прицепной плуг) нагрузками (таблица 4).

Эксперимент также показал, что степень неравномерности распределения вертикальных нагрузок по длине опорной поверхности гусениц находится в прямой пропорциональной зависимости от вертикальной координаты $h_{кр}$ точки приложения крюковой нагрузки. На основе проведенных исследований обоснованы параметры ТДН, обеспечивающие повышение ресурса его ХА и эффективности использования МТА с ТДН в целом. В частности, вместо унифицированной с.-х. навески, обеспечивающей изменение $h_{кр}$ в диапазоне 1050...220 мм, не достаточного для снижения указанной неравномерности до приемлемого уровня, предложено использовать разработанное нами модерни-

зированной подъемно-прицепное устройство (ППУ), которое позволяет уменьшить минимальную высоту прицепной серьги до 70 мм над опорной поверхностью, а при выполнении бульдозерных работ применить разработанное нами устройство для автоматического изменения положения центра тяжести/центра давления БА.

Таблица 4 – Математические ожидания вертикальных нагрузок, действующих на опорные катки трактора (в кН)

№ п/п	Номер опорного катка	каток 1	каток 2	каток 3	каток 4	каток 5	каток 6	Коэффци. вариации v
	Агрегат, вид работ							
1	Т-170М1.03-53 без оборудования	27,4	26,0	23,3	23,0	24,1	25,2	0,0682
2	Т-170М1.03-53 + ПТК-12-40, вспашка стерневого поля	20,6	24,0	26,6	30,4	34,3	36,1	0,21
3	Т-170М1.03-53 с БО, отрывка траншеи (рабочий ход)	29,8	23,3	23,0	26,1	28,5	31,3	0,1273
4	Т-170М1.03-55 (с ППУ) + ПТК-12-40 (пахота)	25,0	25,3	26,0	27,6	28,8	29,3	0,0678
5	Т-170М1.03-55 с БО, отрывка траншеи (рабочий ход)	27,8	28,1	29,4	30,1	30,9	31,1	0,0471

Внедрение вышеперечисленных мероприятий на ТДН типа Т-170М1.03-55 позволило нивелировать вертикальные нагрузки на опорную часть ХА (см. таблицу 4), а также повысить производительность бульдозерного агрегата при разработке суглинка I–II категории в среднем на 7,4%, снизить удельный расход топлива на 1 м³ разработанного грунта в среднем на 5,9%.

В таблице 5 приведены регрессионные зависимости темпов износа ХА трактора от его наработки, полученные на основании анализа результатов эксперимента.

Исходя из видов и объемов необходимых тракторных работ, а также основываясь на полученных зависимостях изменения остаточного ресурса ХА ТА, была составлена типовая программа загрузки ТДН с обеспечением заданного ресурса ХА в объеме 3800 и более часов (таблица 6).

Таблица 5 – Зависимости изменения износа ХА от наработки тракторов

Вид ТА на базе ТДН	Вид выполняемых работ	Фон и тип почвы (грунта)	Время года	Уравнения регрессии (для периода приработки и периода установившегося износа)	
МТА (с-х.)	Чизелевание почвы	Целинные земли	Весна, лето, осень	$I_1(t) = -1,093 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,028 \cdot t + 0,066;$ $I_2(t) = 2,727 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,62$	
		Залежные земли	Весна, лето, осень	$I_1(t) = -1,01 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,028 \cdot t - 0,013;$ $I_2(t) = 2,534 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,508$	
		Старопахотные земли	Весна	$I_1(t) = -0,9175 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,027 \cdot t + 0,103;$ $I_2(t) = 1,533 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,933$	
	Вспашка	Стерневое поле	Осень	Осень	$I_1(t) = -0,9175 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,027 \cdot t + 0,103;$ $I_2(t) = 1,533 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,933$
			Осень	Осень	$I_1(t) = -1,235 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,032 \cdot t + 0,129;$ $I_2(t) = 1,49 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,969$
			Осень	Осень	$I_1(t) = -1,235 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,032 \cdot t + 0,129;$ $I_2(t) = 1,49 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,969$
	Боронование	Отвальный фон	Весна ранняя	Весна ранняя	$I_1(t) = -1,092 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,031 \cdot t + 0,06;$ $I_2(t) = 1,415 \cdot 10^{-3} \cdot t + 2,016$
			Весна (перед посевом зерновых)	Весна (перед посевом зерновых)	$I_1(t) = -1,142 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,032 \cdot t + 0,149;$ $I_2(t) = 1,352 \cdot 10^{-3} \cdot t + 2,027$
			Лето (после посева зерновых)	Лето	$I_1(t) = -0,9043 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,026 \cdot t - 0,014;$ $I_2(t) = 3,308 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,385$
	БА	Бульдозирование (строительно-дорожные и ирригационные работы, снегозадержание)	Суглинки легкие и средние	Лето	$I_1(t) = -1,038 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,027 \cdot t - 2,451 \cdot 10^{-3};$ $I_2(t) = 3,99 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,259$
Суглинки тяжелые			Лето	$I_1(t) = -1,262 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,029 \cdot t + 0,021;$ $I_2(t) = 4,2 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,286$	
Бульдозирование (прокладка и расчистка дорог от снега, различные вспомогательные хозяйственные работы и т. п.)		Грунт мерзлый	Осень, зима, весна	Осень, зима, весна	$I_1(t) = -0,5388 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,022 \cdot t + 0,178;$ $I_2(t) = 8,004 \cdot 10^{-4} \cdot t + 2,201$
			Осень, зима, весна	Осень, зима, весна	$I_1(t) = -0,5388 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,022 \cdot t + 0,178;$ $I_2(t) = 8,004 \cdot 10^{-4} \cdot t + 2,201$

Таблица 6 – Типовая программа эксплуатационной загрузки ТДН

ТДН	Вид работы	Время года, месяц, количество дней/часов	Средний ресурс ХА, мото-ч	Величина снижения среднего ресурса ХА, мото-ч
<i>Первый год эксплуатации</i>				
МТА	Снегозадержание	Зима, январь. 12/84	3900	101,27
БА	Вспомогательные хозяйственные работы (ВХР)	Зима, январь. 11/77	4700	90,69
МТА	Снегозадержание	Зима, февраль. 12/84	3900	98,89
БА	ВХР	Зима, весна. Февраль – апрель. 41/287	4700	332,86
МТА	Закрытие влаги	Весна, апрель. 3/21	3700	24,16
БА	ВХР	Весна, апрель. 7/49	4700	56,2
МТА	Предпосевная культивация (двухкратная)	Весна. Апрель – май. 12/84	2800	93,73
БА	ВХР	Весна, май. 5/35	4700	39,85
БА	Строительные работы (суглинки средние)	Весна, лето. Май – август. 69/483	1400	425,2
МТА	Вспашка зяби	Лето, осень. Август – сентябрь. 38/266	2600	255,04
БА	Бульдозирование (расчистка дорог от снега, различные вспомогательные работы)	Осень, зима. Октябрь – декабрь. 76/532	4700	568,59
	Всего:	286 дн/2002 ч		2086,48
<i>Второй год эксплуатации</i>				
МТА	Снегозадержание	Зима, январь. 9/63	3900	53,81
БА	ВХР	Зима, январь. 14/98	4700	102,24
МТА	Снегозадержание	Зима, февраль. 10/70	3900	57,76
БА	Вспомогательные хозяйственные работы	Зима, весна. Февраль – апрель. 43/301	4700	308,56
МТА	Закрытие влаги	Весна, апрель. 3/21	3700	16,67
БА	ВХР	Весна, апрель. 7/49	4700	49,58
МТА	Предпосевная культивация (двухкратная)	Весна. Апрель – май. 12/84	2800	63,95
БА	ВХР	Весна, лето. Май – август. 74/518	4700	511,28
МТА	Вспашка зяби	Лето, осень. Август – сентябрь. 38/266	2600	162,54
БА	ВХР	Осень, зима. Октябрь – декабрь. 72/504	4700	471,02
	Всего:	282 дн/1974 ч		1797,41
	Итого:			3883,89

Проверка адекватности расчетных зависимостей изменения износа ХА и его остаточного ресурса в течение эксплуатации проводилась по критерию Фишера. Установлено, что максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных не превосходит 7...11 %.

В пятой главе «Экономическая оценка эффективности выбора рациональных схем эксплуатационной загрузки МТА» приведены результаты оценки экономической эффективности выполненных исследований.

Основным показателем экономической оценки применения рациональных схем эксплуатационной загрузки МТА принята величина чистого дисконтированного дохода, получаемая за период эксплуатации ТА с комплектами гусеничных лент и опорных катков при использовании предложенных схем загрузки. Показатели экономической оценки базового и проектного вариантов приведены в таблице 7, интегральные показатели экономической оценки – в таблице 8.

Таблица 7 – Основные показатели экономической оценки (базовый вариант/проектный вариант)

Наименование	Годы					
	1	2	3	4	5	6
Объем работы, час	2002	1974	1992	1965	1983	1956
Цена, руб./час	1375	1540	1709	1880	2050	2214
Выручка от продаж, руб.	2 752 750	3 039 960	3 405 125	3 694 868	4 064 298	4 329 677
Себестоимость продаж, руб.	2 293 958/ 2 183 958	2 554 588/ 2 444 588	2 885 699/ 2 775 699	3 158 007/ 3 048 007	3 503 706/ 3 393 706	3 764 936/ 3 654 936
Валовая прибыль, руб.	458 792/ 568 792	485 372/ 595 372	519 426/ 629 426	536 861/ 646 861	560 593/ 670 593	564 740/ 674 740
Прибыль до налогообложения, руб.	458 792/ 568 792	485 372/ 595 372	519 426/ 629 426	536 861/ 646 861	560 593/ 670 593	564 740/ 674 740
Единый сельскохозяйственный налог и др., руб.	27 528/ 34 128	29 122/ 35 722	31 166/ 37 766	32 212/ 38 812	33 636/ 40 236	33 884/ 40 484
Чистая прибыль, руб.	431 264/ 534 664	456 249/ 559 649	488 260/ 591 660	504 650/ 608 050	526 957/ 630 357	530 856/ 634 256
Внутренняя норма рентабельности, %	18,8/24,5	17,9/22,9	16,9/21,3	16,0/19,9	15,0/18,6	14,1/17,4

Таблица 8 – Интегральные показатели экономической оценки

Показатель	Критерий	Базовое значение	Проектное значение
Ставка дисконтирования, %	D	20	20
Расчетный период, мес.	$T_{расч}$	72	72
Период окупаемости, мес.	$T_{окуп} < T_{расч}$	36	16
Дисконтированный период окупаемости, мес.	$T_{окуп. диск} < T_{расч}$	40	19
Чистый дисконтированный доход, млн руб.	$ЧДД > 0$	1,3	2,6
Индекс прибыльности, доли ед.	$I > 1$	1,07	1,47
Внутренняя норма доходности, %	$ВНД > E^*$	14,1	17,4

* $E = 11\%$ (ключевая ставка ЦБ РФ).

Приведенные расчеты доказали экономическую эффективность выбора рациональных схем эксплуатационной загрузки МТА.

Годовой дисконтированный эффект для выбранной схемы эксплуатационной загрузки МТА составил:

$$\mathcal{E}_T = (2\ 617\ 526 - 1\ 315\ 959) \cdot 2000 : 12\ 000 = 216\ 930 \text{ руб.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что основной причиной, вызывающей снижение ресурса ХА трактора как при заднем (плуг, борона и т. п.), так и при фронтальном агрегатировании (бульдозер), является неравномерное распределение вертикальных нагрузок в пределах длины опорной части гусеницы.

2. Установлено, что для выравнивания нагрузок на ходовой аппарат трактора двойного назначения целесообразно сместить центр тяжести вперед на 140 мм, а также уменьшить вертикальную координату точки приложения тягового сопротивления до 70...100 мм применением предложенного подъемно-прицепного устройства вместо унифицированной с.-х. навески.

3. Разработана математическая модель процесса изменения остаточного ресурса ходового аппарата, которая позволила оценить темп изменения остаточного ресурса узлов и элементов ХА для различных вариантов агрегатирования базового трактора с рекомендуемыми

параметрами. В результате установлено, что наихудшие показатели надежности имеют гусеничные ленты, средний ресурс которых составляет 1950...2110 мото-ч работы.

4. Разработана методика планирования эксплуатационной загрузки ТДН для обеспечения требуемого ресурса ХА при выполнении наиболее вероятных технологических операций. Установлено, что при определенном чередовании сельскохозяйственных работ (пахота, чизелевание и боронование) и бульдозирования обеспечивается постепенный и равномерный износ гусеничных лент, что ведет к увеличению их ресурса до 3800 и более мото-ч.

5. Предложено устройство для изменения положения центра давления и центра тяжести гусеничной машины с рабочим оборудованием (патент на полезную модель № 153663 от 1 июля 2015 г.), позволившее увеличить производительность ТДН с бульдозерным оборудованием в среднем на 7,4%, снизить удельный расход топлива на 1 м³ разработанного грунта в среднем на 5,9% при одновременном снижении вертикальных нагрузок на крайние опорные катки до 15...17% при наборе и транспортировке призмы волочения грунта.

6. Установлено, что показатели надежности, полученные на основе экспериментальных исследований, адекватны теоретическим: максимальное расхождение не превышает 7...11% для всех рассмотренных вариантов.

7. Определена эффективность внедрения усовершенствованного ТДН в сельскохозяйственное производство при выполнении различных видов работ. Годовой экономический эффект для выбранной схемы эксплуатационной загрузки одного МТА составляет 216 930 руб.

В дальнейших исследованиях предполагается адаптировать разработанные математические модели изменения остаточного ресурса ХА, а также методику планирования рациональной эксплуатационной загрузки применительно к МТА на базе гусеничных тракторов с эластичной подвеской.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Бердов, Е. И. Экспериментальное определение оптимального положения центра давления гусеничного трактора двойного на-

значения [Текст] / Е. И. Бердов, **В. А. Алябьев**, Е. Г. Щепетов // Достижения науки и техники АПК. – 2012. – № 7. – С. 78–80.

2. Бердов, Е. И. Влияние изменения положения центра давления на тягово-сцепные качества гусеничного трактора двойного назначения [Текст] / Е. И. Бердов, **В. А. Алябьев**, Е. Г. Щепетов // Достижения науки и техники АПК. – 2012. – № 9. С. 71–74.

3. Бердов, Е. И. Повышение эффективности использования гусеничного трактора двойного назначения обеспечением заданного ресурса ходового аппарата [Текст] / Е. И. Бердов, **В. А. Алябьев** // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 8. С. 70–73.

4. Бердов, Е. И. Кинематика и динамика неведущих ветвей гусеничного обвода тягово-транспортной машины [Текст] / Е. И. Бердов, **В. А. Алябьев** // АПК России. – 2016. – Т. 74. – С. 15–22.

5. Сушков, С. Ю. Техническое оснащение АПК Челябинской области [Текст] / С. Ю. Сушков, **В. А. Алябьев** // АПК России. – 2016. – Т. 75. – С. 110–116.

Публикации в других изданиях

6. Бердов, Е. И. Взаимосвязь параметров надежности ходового аппарата с режимами работы трактора двойного назначения [Текст] / Е. И. Бердов, **В. А. Алябьев** // Материалы I Междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2011. – Ч. IV. – С. 126–137.

7. **Алябьев, В. А.** Метод оценки уровня надежности сложных технических систем на этапе проектирования [Текст] / В. А. Алябьев // Материалы I Междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2011. – Ч. IV. – С. 120–126.

8. **Алябьев, В. А.** Моделирование параметров остаточного ресурса элементов и узлов ходового аппарата гусеничного трактора двойного назначения для различных условий работы МТА [Текст] / В. А. Алябьев, Е. И. Бердов // Материалы II Междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2012. – Ч. IV. – С. 170–173.

9. Бердов, Е. И. Влияние производственно-технологических факторов на остаточный ресурс ходового аппарата трактора двойного назначения [Текст] / Е. И. Бердов, **В. А. Алябьев** // Материалы III Междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2013. – Ч. IV. – С. 35–47.

Авторские свидетельства, патенты

10. А. с. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617557. Расчет коэффициента технического использования тракторного агрегата [Текст] / **В. А. Алябьев**, Е. И. Бердов, Л. Л. Ружьев. – № 2014617557 ; заявл. 28.07.2014 г.

11. А. с. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613551. Расчет потребности в капитальных ремонтах тракторного агрегата [Текст] / **В. А. Алябьев** [и др.]. – № 2015613551 ; заявл. 18.03.2015 г.

12. А. с. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614706. Расчет затрат на изготовление и эксплуатацию тракторного агрегата [Текст] / **В. А. Алябьев** [и др.]. – № 2015614706 ; заявл. 24.04.2015 г.

13. А. с. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615337. Расчет технологической себестоимости выполняемых тракторным агрегатом сельскохозяйственных и дорожно-строительных работ [Текст] / **В. А. Алябьев** [и др.]. – № 2015615337 ; заявл. 15.05.2015 г.

14. Пат. на полезную модель № 153663. Устройство для изменения положения центра давления и центра тяжести гусеничной машины с рабочим оборудованием [Текст] / Е. И. Бердов, **В. А. Алябьев**. – № 153663 ; заявл. 01.07.2015 г.

Подписано в печать 19.04.2017. Формат 60×84/16
Гарнитура Times. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № КЗ-5.

Отпечатано в ИПЦ ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ
454080, г. Челябинск, ул. Энгельса, 83