

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ТРЕНИЯ ФРИКЦИОННЫХ ДИСКОВ НА РЕСУРС ГИДРОПОДЖИМНЫХ МУФТ

Приказчиков Максим Сергеевич, канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры «Надежность и ремонт машин», ФГБОУ ВПО Самарская ГСХА.

446442, Самарская область, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Спортивная 8А, инженерный факультет.

E-mail: prikazchikov_ms@rambler.ru

Ключевые слова: изнашивание, фрикцион, водороживание, смазка, диски, трансмиссия.

Цель исследования – повышение ресурса гидроподжимных муфт коробок передач с гидравлическим управлением улучшением режима трения фрикционных дисков сочетанием модификации поверхностей трения дисков и трибологических свойств минерально-растительной смазочной композиции. Влияние режима трения фрикционных дисков на ресурс гидроподжимных муфт оценивалось: посредством аддитивного критерия, характеризующего положительное влияние градиента твердости поверхностей трения при использовании минерально-растительной смазочной композиции. Для улучшения режима трения фрикционных дисков гидроподжимных муфт предложена модификация поверхностей трения дисков посредством фрикционно-механического латунирования в сочетании с применением минерально-растительной смазочной композиции (50% М-10Г₂ + 50% рапсовое масло). Представленные результаты исследований и их анализ свидетельствуют о том, что реализация рассматриваемых конструктивных мероприятий по модификации поверхностей трения в сочетании с рациональным составом минерально-растительной смазочной композиции, улучшающих режим трения фрикционных дисков без каких-либо дополнительных изменений механической коробки передач с гидравлическим управлением, позволит повысить ресурс гидроподжимных муфт в 1,7 раза.

Основным ресурсопределяющим узлом механической коробки передач с гидравлическим управлением, тракторов «Кировец» производства ЗАО «Петербургский тракторный завод», является гидроподжимная муфта (ГПМ), обеспечивающая переключение передач без разрыва потока мощности. При реализации переключения передач вследствие буксования поверхностей трения ведущие и ведомые диски ГПМ испытывают большие термодинамические нагрузки, приводящие к их короблению и интенсивному изнашиванию, что является причиной снижения ресурса фрикционных дисков на 60% от регламентированного.

Ресурс ГПМ и технико-экономические показатели работы энергонасыщенной автотракторной техники, оснащенной механическими коробками передач с гидравлическим управлением, во многом зависят от параметров режима трения фрикционных дисков. Ухудшение режима трения приводит к интенсивному водороживанию и увеличению износа дисков и, как следствие, к ухудшению динамических характеристик трактора и повышенному расходу топлива. Рациональный режим трения фрикционных дисков определяется эффективным сочетанием смазочной среды, материала и качества сопрягаемых поверхностей трения.

Поэтому актуальными являются исследования, направленные на улучшение режимов трения фрикционных дисков ГПМ путем модификации и повышения уровня насыщения контакта поверхностей трения, а также трибологических свойств смазочного материала.

Цель исследований – повышение ресурса гидроподжимных муфт коробок передач с гидравлическим управлением улучшением режима трения фрикционных дисков сочетанием модификации поверхностей трения дисков и трибологических свойств минерально-растительной смазочной композиции (МРСК).

Задачи исследований: 1) оценить возможность повышения технического ресурса гидроподжимных муфт коробок передач с гидроуправлением применением фрикционных дисков с положительным градиентом твердости поверхностей трения в сочетании с рациональным составом минерально-растительной смазочной композиции; 2) экспериментально оценить влияние на ресурс гидроподжимных муфт сочетания модификации поверхностей трения дисков и трибологических свойств МРСК и критерияльно установить рациональный режим трения фрикционных дисков гидроподжимных муфт.

Материалы и методы исследований. В качестве объекта исследований выбран процесс трения модифицированных рабочих поверхностей фрикционных дисков ГПМ при использовании МРСК. Исследования параметров рационального режима трения фрикционных дисков ГПМ выполнены с применением основных положений, законов и методов трибологии, математического анализа и математического моделирования. Экспериментальные исследования выполнены с использованием стандартных и разработанных частных методик исследований.

Результаты исследований. Для решения поставленных задач был проведен анализ научно-технической литературы и научных работ, на основании которого была создана трибологическая система контакта фрикционных дисков, позволяющая оценить взаимосвязь входных и выходных параметров

и определить рациональную функциональную зависимость трибологических параметров от режимов трения при некоторой системе ограничений, например, ресурс сопряжения.

Известно, что сила трения при контакте F , согласно молекулярно-механической теории трения, складывается из суммы адгезионной F_a и когезионной F_k составляющих. Основываясь на этом, адгезионную составляющую коэффициента трения f_a в пластическом контакте можно записать в виде выражения

$$f_a = \frac{\tau_0}{HB} + \beta_2 = const, \quad (1)$$

где τ_0 – касательные напряжения, не зависящие от нормальных, МПа; β_2 – молекулярная константа трения; HB – твердость материала диска по Бринеллю.

Анализируя данное выражение, можно сказать, что снижение твердости HB поверхностного слоя в условиях пластического контакта приведет к увеличению коэффициента трения f_{TP} , облегчая формирование поверхностей трения фрикционных дисков с большей фактической площадью контакта и меньшей удельной силой трения, что повысит их несущую способность, увеличит ресурс ГПМ. Таким образом, современная трибология обосновывает применение фрикционных дисков с положительным градиентом твердости Γ_T , который можно представить в виде неравенства:

$$\Gamma_T = (dH/dh) > 0, \quad (2)$$

где dH – распределение микротвердости, H_V ; dh – глубина измерения твердости материала, мм.

Однако снижение удельных нагрузок может привести к увеличению толщины смазочного слоя, снижению коэффициента трения, момента трения M_{ψ} ГПМ, выражаемого зависимостью (3) и нарушению режима ее работы:

$$M_{\psi} = \beta \cdot M_n = F_d \cdot f_{TP} \cdot R_{TP} \cdot z_d, \quad (3)$$

где M_{ψ} – момент трения полностью включенной муфты, Н·м; β – коэффициент запаса, 1,7-2; M_n – номинальный крутящий момент, Н·м; R_{TP} – радиус трения, м; z_d – число пар трения; F_d – суммарное осевое усилие дисков, Н.

Тогда, с точки зрения оценки ресурса ГПМ, необходимо рассматривать взаимосвязь коэффициента трения и градиента твердости рабочей поверхности фрикционного диска. Представим коэффициент трения выражением, описываемым И. В. Крагельским:

$$f_{TP} = \frac{\alpha_2 \cdot A_r}{P} + \beta_2, \quad (4)$$

где P – нормальная нагрузка при контакте, Н; A_r – фактическая площади контакта мм²; α_2 и β_2 – константы исследуемой пары трения.

Согласно молекулярно-механической теории трения выражение (4), применительно к работе ГПМ, показывает целесообразность увеличения адгезионной F_a составляющей и уменьшения когезионной F_k составляющей силы трения. В данном случае этого можно достичь увеличением фактической площади контакта, а не повышением нагрузки P , сжимающей диски, тем самым уменьшая толщину масляной пленки в зоне контакта. Рациональным путем достижения этого является модифицирование поверхности трения фрикционных дисков ГПМ методом нанесения функционального покрытия способом фрикционно-механического латунирования на стадии их изготовления.

Исходя из анализа трибологической системы фрикционных дисков с положительным градиентом твердости и взаимосвязи параметров процесса трения, можно представить момент трения фрикционных дисков в качестве критерия оценки одного из параметров режима трения, выраженного в виде функциональной зависимости:

$$K_M = f(\Gamma_T, f_{TP}) = f(A_r, HB, DC, SP, M_C), \quad (5)$$

где DC – диффузия мягких металлов; SP – наличие сервовитной пленки; M_C – толщина смазочного слоя.

Наиболее существенным из факторов, оказывающих влияние на износостойкость фрикционных узлов, является температура поверхностей трения. Анализ температурной напряженности фрикционных дисков при модификации поверхностей трения посредством расчета системы уравнений тепловой динамики, предложенной Н. Б. Демкиным, указывает, что при определенном шаге времени буксования Δt мощность буксования поверхностей трения пары фрикционных дисков в момент времени t_i можно записать в следующем виде:

$$N_j(t) = M_j(t) \left[\dot{\varphi}_{j,1}(t_1) - \dot{\varphi}_{j,2}(t_1) \right], \quad (6)$$

где $M_j(t)$ – момент трения, развиваемый j -й парой в момент времени t_i , Н·м; $\dot{\varphi}_{j,1}$, $\dot{\varphi}_{j,2}$ – угловые скорости вращения фрикционных дисков, с⁻¹.

Момент трения фрикционных дисков

$$M(t) = f_{\text{дин}} R_{\text{CP}} z_{\text{TP}} (pS_{\text{б}} - P_{\text{ПР}} + P_{\text{ЦБ}}) = f_{\text{дин}} C_1 C_2, \quad (7)$$

где $f_{\text{дин}}$ – динамический коэффициент трения фрикционной пары; R_{CP} – средний радиус фрикционных дисков, м; z_{TP} – число пар трения в ГПМ; p – давление масла в бустере фрикциона, МПа; $S_{\text{б}}$ – площадь бустера, м²; $P_{\text{ПР}}$ – сила упругости пружин, Н; $P_{\text{ЦБ}}$ – сила центробежного давления масла на нажимной диск в осевом направлении, Н.

Представим динамический коэффициент трения фрикционной пары $f_{\text{дин}}$, в виде функции двух основных параметров:

$$f_{\text{дин}} = f(A_r; P) \text{ или } f_{\text{дин}} = \psi A_r P, \quad (8)$$

где ψ – коэффициент пропорциональности.

Введя коэффициент пропорциональности, учитывающий давление в контакте поверхностей фрикционных дисков x , получим

$$f_{\text{дин}} = x A_r. \quad (9)$$

Выражение (9) показывает, что увеличение A_r приведет к росту $f_{\text{дин}}$, и в соответствии с формулой (7) к повышению момента трения фрикционных дисков. В результате этого будет возрастать работа буксования ГПМ (6). Тогда суммарная работа буксования, затрачиваемая i -й парой трения в момент времени t_i , будет равна:

$$W_{mi} = \sum_{i=\Delta t}^{k \cdot \Delta t} N_i(t) \Delta t_i. \quad (10)$$

Таким образом, можно констатировать, что фактическая площадь контакта сопрягаемых поверхностей является основным параметром, определяющим температурный режим и параметры буксования ГПМ при переключении передач, что согласуется с работами Н. Г. Бардзимашвили, А. В. Бойкова, Н. Б. Дёмкина, Е. А. Шувалова, С. Г. Яшвили и др., а превалирующее влияние температуры на работу буксования $W_{\text{ни}}$ можно использовать для критериальной оценки тепловой напряженности фрикционных дисков:

$$K_T = f(A_r, P(t), C_i) = f(N). \quad (11)$$

Высокие температуры в зоне трения фрикционных дисков, обусловленные термодинамическими нагрузками, возникающими в процессе буксования, приводят к усиленному наводороживанию поверхностей трения. Процесс наводороживания поверхностей трения фрикционных дисков приводит к снижению качества поверхностей трения фрикционных дисков и снижению их износостойкости. Все это обуславливает снижение фактической площади контакта, приводит к прогрессирующему изнашиванию, что дает возможность представить критерий оценки изнашивания K_U фрикционных дисков ГПМ в виде зависимости скорости изнашивания U от насыщенности контакта A_r и величины сорбции водорода в поверхности трения фрикционных дисков H :

$$K_U = f(U) = f(A_r, H). \quad (12)$$

Оценить составляющие трибологической системы в общей совокупности их влияния на процесс изнашивания фрикционных дисков обобщенным показателем – достаточно сложная задача. Наиболее доступным показателем многомерной статистической величины, обеспечивающим равновесность всех одномерных факторов, является *аддитивный* критерий, позволяющий получить наименованную величину, а отсутствие сложных математических операций позволяет сохранить первую степень показателя. В общем виде, используемые для расчета аддитивного критерия показатели можно представить в виде функции

$$K_i = f(K_U, K_T, K_M), \quad (13)$$

где K_U , K_T , K_M – индексный показатель соответственно скорости изнашивания, изменения температуры и момента трения.

Для оценки уровня улучшения режима трения фрикционных дисков ГПМ при обоснованном сочетании твердости поверхностей трения и различного состава МРСК, рациональным можно считать аддитивный критерий с наименьшим суммарным значением, т.е. $K_A \rightarrow \min$.

Предлагаемый аддитивный критерий складывается из двух частных показателей, рассчитанных с учетом модификации поверхностей трения фрикционных дисков и изменения МРСК гидроподжимной муфты:

$$K_A = K_{\text{МП}} + K_{\text{ССМ}}, \quad (14)$$

где $K_{\text{МП}}$ – частный показатель оценки модификации поверхности трения фрикционных дисков; $K_{\text{ССМ}}$ – частный показатель оценки состава смазочной среды.

Для расчета индексных показателей воспользуемся методом подобия:

$$K_{U_i} = \frac{U_i}{U_{\text{CP}}}; \quad K_{T_i} = \frac{T_i}{T_{\text{CP}}}; \quad K_{M_i} = \frac{M_i}{M_{\text{CP}}}, \quad (15)$$

где U_i , T_i , M_i – численные (измеренные) значения соответственно скорости изнашивания, температуры и момента трения в каждом конкретном опыте; U_{CP} , T_{CP} , M_{CP} – средние значения соответственно скорости изнашивания, температуры и момента трения в каждом отдельном цикле опытов.

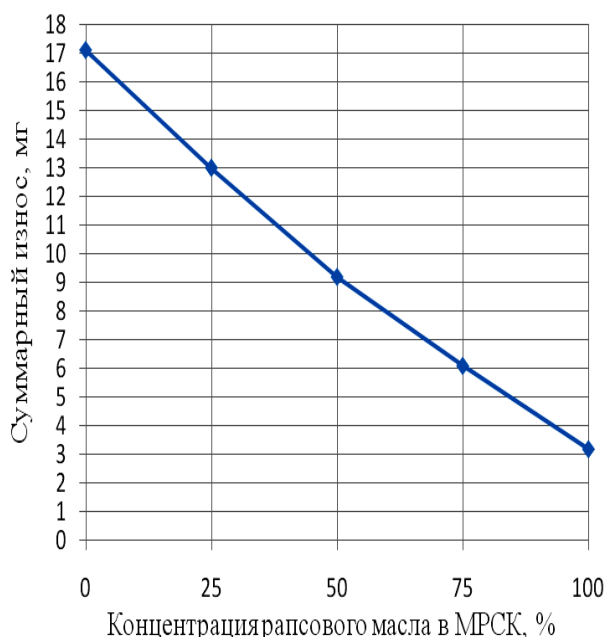


Рис. 1. Зависимость суммарного износа сопряжения от концентрации РМ в МРСК

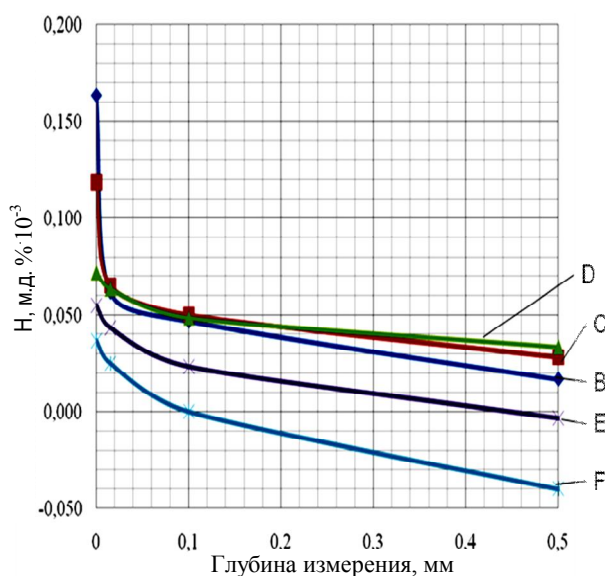


Рис. 2. Средняя величина сорбции водорода в сопряжении «ролик-колодка» при различном составе МРСК: В, С, D, E, F – составы МРСК соответственно с концентрацией РМ 0; 25; 50; 75 и 100%

На рисунке 1 представлены результаты исследований процесса изнашивания образцов в зависимости от состава МРСК на роликовой машине трения 2070 СМТ-1. Анализ данной зависимости выявил, что максимальный износ сопряжения «ролик-колодка» наблюдается при отсутствии рапсового масла (РМ). С увеличением концентрации РМ в составе МРСК износ уменьшается по обратно пропорциональной зависимости, что можно объяснить меньшей склонностью к деструкции РМ, т.е. меньшей склонностью к образованию свободного водорода и эффектом возникновения на поверхностях фрикционных дисков пленки поверхностно-активных веществ (ПАВ) органического происхождения, содержащихся в РМ. При исследовании образцов на наводороживание, работавших в различной смазочной среде, было выявлено что образцы, работавшие в МРСК с большим процентным содержанием РМ, менее предрасположены к наводороживанию поверхностных слоев (рис. 2).

Анализ полученных результатов исследований позволяет установить, что при увеличении степени наводороживания износ образцов увеличивается, РМ ввиду своих поверхностно-активных свойств препятствует сорбции водорода, а увеличение его концентрации в МРСК более 50% менее эффективно, так как превышение концентрации РМ в МРСК более 50% приводит к обезводороживанию внутренних слоев материала образцов (рис. 2) за счет перемещения водорода из внутренних слоев ближе к поверхности трения. Рациональным составом МРСК при этом следует считать состав D, т.е. 50% М-10Г₂ + 50%РМ.

Анализ результатов дальнейших исследований на изнашивание фрикционных дисков, проведенных по схеме «кольцо-кольцо» при помощи трибометра (табл. 1) показали, что износ сопряжения значительно снижается с уменьшением градиента твердости. Оценка температурного режима при проведении исследований на трение и изнашивание показала, что предпочтительнее использовать модифицированные фрикционные диски с градиентом твердости сопряжения $G_T = 0,87$ при применении в качестве смазочного материала МРСК с 50% содержанием РМ ввиду наименьшей тепловой напряженности фрикционных дисков (снижение тепловой напряженности с 250 до 146°C).

Анализ показателей режима трения при проведении износных исследований наглядно подтверждает данный вывод. Так, при заявленных параметрах наблюдается достаточно высокое значение момента трения, низкие скорость изнашивания и температурный режим работы (табл. 1).

Также экспериментально установлено увеличение фактической площади контакта в среднем 11,5%. Так, у серийных заводских фрикционных дисков $A_r = 0,0795-0,0823$ мм², а у модифицированных фрикционных дисков $A_r = 0,0889-0,0933$ мм².

Для определения показателей рационального режима трения фрикционных дисков были вычислены индексные и частные показатели аддитивного критерия, что позволило произвести оценку режимов трения фрикционных дисков посредством расчета аддитивного критерия, характеризующего комплексное влияние

качества поверхностей трения и смазочной среды на ресурс фрикционных дисков. На основании полученных данных построена поверхность отклика, показывающая изменение аддитивного критерия в зависимости от градиента твердости и состава смазочной среды (рис. 3).

Таблица 1

Показатели режима трения образцов по результатам исследований на трибометре

Содержание РМ в МРСК, %	Градиент твердости сопряжения, Γ_T	Температура, °С	Момент трения, Н·м	Средняя скорость изнашивания U_{CP} , мкм/с
0	1	250	0,308	8,007
	0,95	237	0,403	1,181
	0,91	223	0,225	1,132
	0,87	196	0,421	0,806
50	1	182	0,376	0,875
	0,95	159	0,359	0,244
	0,91	130	0,259	0,180
	0,87	146	0,430	0,196
100	1	198	0,522	2,222
	0,95	155	0,311	1,667
	0,91	96	0,220	0,972
	0,87	163	0,325	1,486

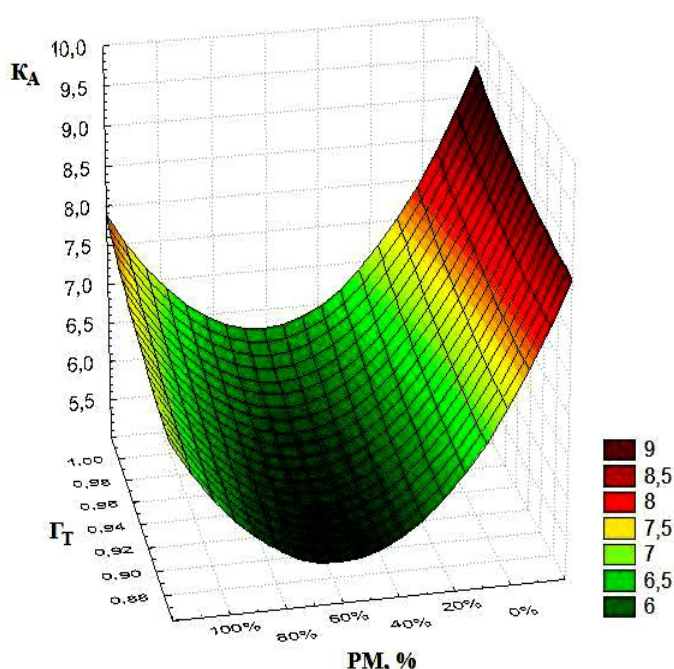


Рис. 3. Изменение аддитивного критерия K_A в зависимости от градиента твердости сопряжения Γ_T и состава МРСК

Экспериментально установлено изменение аддитивного критерия $K_A = 7,941-5,492$ и его рациональное значение ($K_A = 5,492$), подтверждающее рациональное сочетание состава МРСК (50% М-10Г₂ + 50% РМ), выступающего в качестве смазочной среды, и градиента твердости сопряжения поверхностей трения дисков ($\Gamma_T = 0,87$).

Стендовые и ресурсные исследования модифицированных фрикционных дисков при использовании МРСК, содержащей 50% РМ, показали снижение концентрации железа в смазочной среде по сравнению с заводским вариантом. В среднем за период исследований концентрация железа в смазочном материале коробок передач в заводском варианте была на 33,1% выше, чем в опытном варианте. По результатам обработки полученных данных и зависимостей накопления железа, проведена аналитическая оценка влияния рационального режима трения фрикционных дисков на ресурс ГПМ и получены выражения:

$$C_{Fe \text{ Баз}} (\text{пред.}) = 0,0084 \cdot T_{H1} + 3,5827, \quad (16)$$

$$C_{Fe \text{ Опыт}} (\text{пред.}) = 0,0066 \cdot T_{H2} - 0,1313, \quad (17)$$

где $C_{Fe \text{ Баз}} (\text{пред.})$, $C_{Fe \text{ Опыт}} (\text{пред.})$ – концентрация железа в масле, соответствующая предельному состоянию ГПМ при проведении ускоренных ресурсных исследований соответственно в базовом и опытном вариантах, %; T_{H1} , T_{H2} – ресурс ГПМ соответственно при базовом и опытном варианте исследований, с.

Результаты ускоренных ресурсных исследования показали, что среднее содержание железа в смазочной среде в заводском варианте $C_{Fe \text{ Баз}} = 21,3 \cdot 10^{-3} \%$, а в опытном варианте $C_{Fe \text{ Опыт}} = 14,25 \cdot 10^{-3} \%$.

Оценка степени увеличения ресурса ГПМ при реализации рационального режима трения фрикционных дисков, полученная из отношения ресурса T_{H2} к T_{H1} , показала увеличение ресурса при опытном варианте T_{H2} в сравнении с заводским вариантом T_{H1} в 1,7 раза.

Заключение. Анализом основных направлений снижения изнашивания фрикционных дисков, как ресурсопределяющих элементов ГПМ механических коробок передач тракторов с гидроуправлением, установлена эффективность использования МРСК в связи с активным взаимодействием с поверхностями трения и снижением их водородного изнашивания. Обоснована возможность повышения ресурса фрикционных дисков путем технологического формирования поверхностей трения с положительным градиентом твердости.

Обоснована аналитически зависимость аддитивного критерия от твердости поверхностных слоев и состава МРСК. Экспериментально установлено изменение аддитивного критерия $K_A = 5,492-7,941$ и его рациональное значение ($K_A = 5,492$), обосновывающее выбор режима трения фрикционных дисков на основе рационального сочетания состава МРСК (50% М-10Г₂ + 50% РМ), выступающей в качестве смазочной среды, и градиента твердости поверхностей трения дисков ($G_T = 0,87$), повышающего ресурс ГПМ в 1,7 раза.

Библиографический список

1. Влияние минерально-растительных топлив и смазочных комбинаций на трибологические параметры ресурсопределяющих сопряжений в с.х. технике : отчет о НИР (промежут.) / ВНИЦентр. – М. : ВНИПИ ОАСУ, 2007. – 172 с. – № ГР 01.200511089. – Инв. № ОЦ02604И5В.
2. Володько, О. С. Результаты ускоренных ресурсных испытаний гидроподжимных муфт / О. С. Володько, М. С. Приказчиков // Известия ФГОУ ВПО Самарская ГСХА. – 2011. – №3. – С. 73-76.
3. ГОСТ Р 53457-2009. Масло рапсовое. Технические условия. – Введ. 2011-01-01. – М. : СТАНДАРТИНФОРМ, 2009. – 16 с.
4. ГОСТ 12337-84. Масла моторные для дизельных двигателей. Технические условия. – Введ. 1985-01-01. – М. : СТАНДАРТИНФОРМ, 2009. – 12 с.
5. Приказчиков, М. С. Повышение ресурса гидроподжимных муфт коробок передач с гидроуправлением улучшением режима трения фрикционных дисков : дис. ... канд. техн. наук / Приказчиков Максим Сергеевич. – Пенза, 2013. – 197 с.
6. Приказчиков, М. С. Оценка эффективности модифицирования поверхности трения гидроподжимных муфт / М. С. Приказчиков, О. С. Володько // Известия Самарского НЦРАН. – Самара : СГТУ, 2011. – Т. 13, №4 (42) (3). – С. 268-271.
7. Приказчиков, М. С. Улучшение режима трения фрикционных дисков механической коробки передач с гидравлическим управлением трактора «Кировец» / М. С. Приказчиков, М. В. Сазонов // Достижения науки агропромышленному комплексу : сб. науч. тр. – Самара : РИЦ СГСХА, 2013. – С. 38-42.
8. Трибология : международная энциклопедия. Т. 1. Историческая справка, термины, определения / под ред. К. Н. Войнова. – СПб. : АНИМА ; Краснодар, 2010. – 176 с.
9. Улучшение режимов трения фрикционных дисков гидромеханических коробок передач энергонасыщенных тракторов : отчет о НИР (промежут.) / ВНИЦентр. – М. : ВНИПИОАСУ, 2011. – № ГР 01.201062609. – Инв. № 02.201252363.

УДК 621.89.017:892.5

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА СМАЗЫВАНИЯ ОПОРНЫХ КАТКОВ ГУСЕНИЧНОГО ТРАКТОРА

Бухвалов Артем Сергеевич, инженер научно-исследовательской лаборатории кафедры «Тракторы и автомобили», ФГБОУ ВПО Самарская ГСХА.

446442, Самарская область, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2.

E-mail: fleischwolf@list.ru

Володько Олег Станиславович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Тракторы и автомобили», ФГБОУ ВПО Самарская ГСХА.

446442, Самарская область, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2.

E-mail: volodko-75@mail.ru

Ленивцев Александр Геннадьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Механизация, автоматизация и электроснабжение строительства», ФГБОУ ВПО Самарский ГАСУ.

443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194.

E-mail: lenivtsev-aleksandr@yandex.ru

Ключевые слова: ресурс, каток, режим, трение, изнашивание.

В статье представлены результаты исследований модернизированной смазочной системы опорных катков гусеничного трактора. Целью исследований является повышение ресурса подшипников опорных катков гусеничных тракторов совершенствованием смазочной системы за счет применения рапсово-минеральной смазочной