

УДК 621.86. 621. 629.3; 669.54. 793

## Черных И.Д. Исследование физико - механических свойств диффузионных покрытий

Investigation of the physico-mechanical properties of diffusion coatings

**Черных Игорь Дмитриевич**

студент группы ДМ 230 Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия  
Научный руководитель

**Тойгамбаев С.К.**

д.т.н., профессор кафедры технической сервис машин и оборудования. Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.

Chernykh Igor Dmitrievich,

student of DM 230 group, Timiryazev Russian State Agrarian University, Moscow, Russia

Scientific supervisor

Toygambaev S.K.,

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technical Service of Machinery and Equipment, K.A. Timiryazev Russian State Agrarian University, Moscow, Russia

**Аннотация.** В настоящее время разработка новых технологий ремонта изношенных деталей или совершенствование существующих восстановительных операций становится ещё более актуальным, так как стоимость новых машин такова, что во многих случаях эксплуатирующие организации не имеют, зачастую, возможности их приобретения. Хорошо известно, что применение прогрессивных технологий при восстановлении изношенных деталей в 5...8 раз сокращает количество операций по сравнению с их изготовлением, 10...20 раз снижает расход материала. В данной статье представлены результаты исследования на износостойкость восстановленных бронзовых подшипников скольжения.

**Ключевые слова:** подшипник скольжения; термодиффузия; термоциклический процесс; бронзовая втулка; металлизация; сопряжения.

**Abstract.** Currently, the development of new technologies for repairing worn-out parts or improving existing repair operations is becoming even more urgent, since the cost of new machines is such that in many cases operating organizations often do not have the opportunity to purchase them. It is well known that the use of advanced technologies in the restoration of worn parts in 5...8 times reduces the number of operations compared to their manufacture, reduces material consumption 10...20 times. This article presents the results of a study on the wear resistance of refurbished bronze plain bearings.

**Keywords:** sliding bearing; thermodiffusion; thermocyclic process; bronze sleeve; metallization; interfaces.

**Рецензент:** Сагитов Рамиль Фаргатович, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе в ООО «Научно-исследовательский и проектный институт экологических проблем», г. Оренбург

Анализ деталей из цветных металлов, предложенных для восстановления их методом термодиффузионной металлизации, показывает, что основными марками материала восстанавливаемых деталей являются оловянистые и алюмини- железистые бронзы. Наиболее распространенные из них - марки Бр.05Ц5С5, Бр.ОСЮ - 2 и бронза

Бр.АЖ9 - 4. Поэтому для наших экспериментов были выбраны данные марки материала деталей. Химический состав данных сплавов приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав бронзовых сплавов.

Марки Бронз	Содержание элементов, %						Твердость, Мн/м <sup>2</sup>	ГОСТ
	Sn	Zn	Al	Fe	Pb	Cu		
Бр.05Ц5С5	4,0...6,0	4,0...6,0	--	--	4,0...6,0	Осталь	600	613.79
Бр.ОС10-10	9,0...11,0	--	--	--	9,0...11,0	Осталь	550	5017-74
Бр.АЖ 9-4	--	--	8,0...10,0	2,0...4,0	--	Осталь	1100	--

Для основных экспериментов была выбрана втулки опорных катков экскаваторов, чертёж которой показан на рис. 1 и втулки верхней головки шатунов двигателя СМД 60 с внутренним диаметром  $45^{+0,041}_{+0,025}$  мм и наружным диаметром  $51^{+0,133}_{+0,087}$  мм. Выбор диффузионных смесей. Исследованию подвергались две группы деталей (втулки верхней головки шатунов и втулки ходовой тележки экскаватора). Данные детали существенно отличались по величине износа:

- 90...95 % втулок верхней головки шатунов имели износ в пределах 0,05...0,07 мм и максимальный и з н о с - д о 0,11 мм; - втулки ходовой тележки экскаваторов имели среднюю величину износа 1,20 мм и максимальный износ до 2,2 мм.

Среди известных ремонтных технологий по восстановлению данных дета- лей наибольший интерес представляют технологии, в которых использованы следующие диффузионные смеси : а) для термодиффузионной металлизации втулок верхней головки шатуна : -ферротитан марки ФТиЗОА или ФТи65-40% -фтористый кальций - 4 % -хлористый цинк -7 % -порошковый цинк -2 % -оксид алюминия - 47 % б) для термодиффузионной металлизации втулок ходовой тележки экскаваторов: - хлористый цинк - 3 % ; - оксид алюминия - 25 %; -композиционный порошковый сплав марки ПР-Х18Н9-50%; - порошковый цинк-22%.

Химический состав композиционного порошкового сплава в ПР-Х18Н9%:

- хром -8...20%; - никель - 8 ... 11 %; - углерод-не более 0,12%; - кремний - не более 0,8 %; - марганец-не более 1,0%; - железо - остальное.

Для анализа эффективности применения состава диффузионной смеси при оценке интенсивности линейного приращения диффузионного слоя изношенной поверхности введем понятие «коэффициента относительной эффективности диффузионного процесса ( $K_{э.д.п.}$ )». Данный коэффициент есть отношение величины линейного приращения диффузионного слоя изношенной поверхности к толщине диффузионного слоя во внутрь материала детали от изношенной поверхности (подложки) т.е. к относительно бесполезному диффузионному слою детали, который не входит в зону

износа поверхностного слоя. С этой целью были построены диаграммы на данных диаграммах были показаны величины приращения линейных размеров и глубина диффузионного слоя при применении диффузионных смесей при термодиффузионной металлизации втулок верхних головок щатунов и втулок опорного катка экскаватора ЭО 5146. Одновременно на данных диаграммах показаны изменения коэффициента относительной эффективности линейного приращения диффузионного слоя в процессе диффузии  $K_{э.д.п.}$

Чем больше данный коэффициент, тем более эффективно идет процесс линейного приращения размера изношенной поверхности за счет роста толщины диффузионного слоя «подложки». Таким образом, приведенный анализ диаграмм и коэффициента относительной эффективности диффузионного процесса показывает, что необходимо подобрать такой состав диффузионных смесей и технологических режимов термодиффузионной металлизации, которые позволили бы более интенсивно создавать диффузионный слой для приращения линейного размера изношенной поверхности детали, а не упрочнять слои детали, не подвергающихся износу. Контроль качества диффузионных покрытий проводился после извлечения деталей из контейнера и их очистки от остатков порошка. Данный контроль включал в себя следующие операции:

- визуальный осмотр диффузионной поверхности; - измерение линейных размеров детали; - определение глубины диффузионного слоя.

Гладкая поверхность детали свидетельствовала о нормальном прошедшем процессе. Наличие различных пятен, пор, раковин, спекания порошка указывало на неправильно выбранные режимы диффузионного процесса.

Для контроля наружных размеров детали до и после термодиффузионной металлизации использовался вертикальный оптиметр модели ВТ - 2 с точностью измерительной головки, обеспечивающей точность измерения 0,005 мм. Контроль внутренних размеров осуществлялся нутромером модели 109 с измерительной головкой 2Р1Г с точностью измерения 0,005 мм. Для исследования глубины диффузионного слоя применялся металло-микроскоп МИМ -8 и микротвердомер ПМТ-3М. с помощью шлифов, изготавливаемых по стандартной методике.

В исследовании физико-механических свойств диффузионных покрытий входило:

- определение поверхностной твердости диффузионного слоя;
- определение микротвердости по глубине диффузионного слоя;
- определение плотности восстановленной поверхности;
- определение износостойкости восстановленной поверхности.

Поверхностная твёрдость диффузионного слоя определялась по методу Роквелла (ГОСТ 2297775 - 78) на твердомере ТКС - 1 М (ГОСТ 12165 - 66) путём вдавливания алмазного конуса при нагрузке 147Н. Значение твёрдости - по показаниям шкалы «А». Для определения поверхностной твёрдости внутренней поверхности детали деталь разрезалась на сектора. Микротвёрдость по глубине диффузионного слоя измерялась на микро- твердомере ПМТ-3М в соответствии с методикой, утверждённой ГОСТом 9459 - 79.

Плотность - одна из основных характеристик, определяющая эксплуатационные свойства покрытия, полученного при диффузионном процессе. Пониженная плотность (менее 90%) по сравнению с плотностью компактных материалов приводит к значительному снижению прочности, пластичности и других свойств поверхностного слоя. Плотность поверхностного слоя восстановленной детали, полученного при термодиффузионной металлизации, зависит от объёма приращенного диффузионного слоя и параметров режима диффузии. Плотность приращенного диффузионного слоя есть отношение массы данного слоя к его объёму:

$$\gamma_{\text{сл}} = \frac{M_{\text{сл}}}{V_{\text{сл}}}, \quad \text{г/см}^3 \quad (1)$$

Если массу приращенного диффузионного слоя достаточно легко рассчитать, то определение объёма этого слоя представляет большие трудности. Наиболее точно объём приращенного диффузионного слоя можно определить по методике, основанной на гидростатическом взвешивании деталей до диффузионного процесса и после. Точность определения плотности повышается с уменьшением примесей жидкости, используемой для взвешивания. Поэтому при гидростатическом взвешивании используется дистиллированная вода.

Взвешивание деталей с точностью  $\pm 1 \times 10^{-5}$  кгс производилось на весах модели АДВ - 200, переоборудованных для гидростатического взвешивания рис. 1. Деталь 4 подвешивается на тонкой проволочке 2. Масса правой чаши весов уравнивается массой гирек 1, учитывая массу проволочки 2. Взвешивание детали производится в сосуде 3.

Масса детали до диффузии определяется взвешиванием его на воздухе, а объём детали - гидростатическим взвешиванием. Поскольку разница в массе детали, полученной при взвешивании на воздухе и в погруженном состоянии, пропорциональна объёму детали, то объём детали  $V_{\text{дет.}}$  будет равен;

$$V_{\text{дет.}} = \frac{M-Q}{\gamma_b}, \quad \text{см}^3 \quad (2)$$

где: М - масса детали на воздухе, гр ; Q - масса детали в воде, гр;

$\gamma_b$  - плотность дистиллированной воды, г / см<sup>3</sup>.

Таким образом, объём детали до диффузионного процесса определяется из выражения:

$$V_1 = \frac{M_1 - Q_1}{\gamma_b}, \quad \text{см}^3 \quad (3)$$

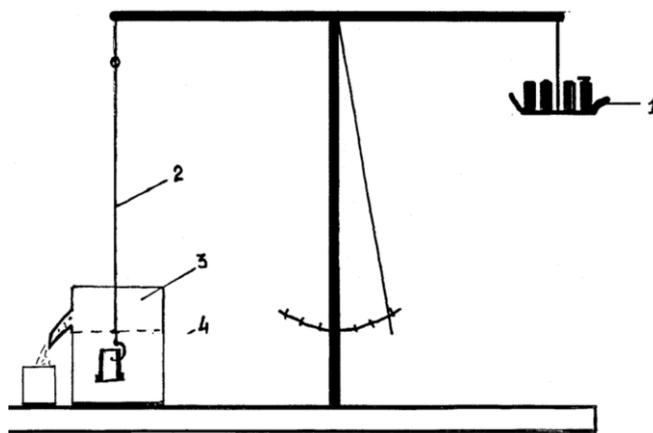


Рис. 1. Схема установки определения плотности напеченного слоя:

1 - гирька, 2 - проволока, 3 - сосуд с жидкостью,  
4 – образец - детали после диффузии:

$$V_2 = \frac{M_2 - Q_2}{\gamma_b}, \quad \text{см}^3 \quad (3)$$

Масса приращенного диффузионного слоя определяется как разность масс, полученных взвешиванием на воздухе после диффузионного процесса ( $M_2$ ) и до процесса ( $M_1$ ), т.е.

$$M_{\text{сл}} = M_2 - M_1, \quad (\text{кгс}) \quad (4)$$

Масса приращенного диффузионного слоя в воде определяется как:

$$Q = Q_2 - Q_1 \quad (5)$$

Объём приращенного диффузионного слоя  $V_{\text{сл}}$  находится из выражения:

$$V_{\text{сл}} = \frac{M_{\text{сл}} - \Delta Q}{\gamma_b}, \quad \text{см}^3 \quad (6)$$

После преобразования формулы 6 получаем:

$$V_{\text{сл}} = \frac{\gamma_b}{1 - \frac{\Delta Q}{M_{\text{сл}}}}, \quad (7)$$

Из технической документации известно, что плотность бронз составляет:  
Бр. 05Ц5С5 --8,84 г/см<sup>3</sup>; Бр. ОЦ10-2 --8,78 г/см<sup>3</sup>; Бр. АЖ-9-4 --7,5 г/см<sup>3</sup>.

Таким образом, отправной точкой сравнения плотности диффузионного слоя восстановленной бронзовой детали являются вышеприведенные данные в соответствии с ГОСТом 23.224 - 86 «Методы оценки износостойкости»

восстановленных деталей» была принята группа А методов испытаний.

Испытания, сущность которых состоит в определении соотношения интенсивностей изнашивания исследуемой (восстановленной) и эталонной поверхностей, испытываемых при заранее установленных идентичных условиях.

Был выбран метод испытания восстановленных поверхностей на износостойкость при трении о не жёстко закреплённые абразивные частицы (ГОСТ 23.208-79).

Сущность метода состоит в том, что при одинаковых условиях производят трение исследуемых образцов об абразивные частицы, подаваемые в зону трения и прижимаемые к образцу вращающим резиновым роликом. Износ образца определялся весовым методом. Схема испытательной установки приведена на рис. 2. Установка имеет привод 4, обеспечивающий вращение втулки 1 и отдельный привод 5, вращающий резиновый ролик 2. С помощью тарированной пружины 6 регулируется усилие прижатия резинового ролика к внутренней поверхности втулки. По лоткам 7 абразивный материал поступает в зону контакта втулки с резиновым роликом. Диаметр резинового ролика составлял 0,7...0,8 номинального внутреннего диаметра восстановленной поверхности втулки. Внутренний диаметр восстановленной втулки после термодиффузионного процесса растачивался до номинального размера по чертежу. Расточка производилась расточным резцом с пластиной твердого сплава ВК4. Механическая обработка диффузионного слоя обеспечивала шероховатость поверхности в пределах 1,2...0,8 мкм., которая определялась с помощью профилометра - профилографа модели 202 завода «Калибр» Угловая скорость втулки и резинового ролика отличались друг от друга в пределах 15...20 %. Вращение встречное. Частота вращения втулки составляла 120 об./мин. Предварительные эксперименты показали, что частота вращения сопрягаемой пары практически не влияет на результаты исследований, поэтому данная частота принята, исходя из удобства проведения экспериментов.

Абразивный материал - электрокорунд белый зернистостью 10 П по ГОСТ 3647-88. Повторное использование абразивного материала не допускалась.

Износ испытываемых образцов - деталей определяли путём взвешивания до и после испытаний с погрешностью не более 0,1 мг. Испытания проводили по каждому исследуемому режиму 3-х кратной повторности. По результатам взвешивания образцов до и после испытаний определяют

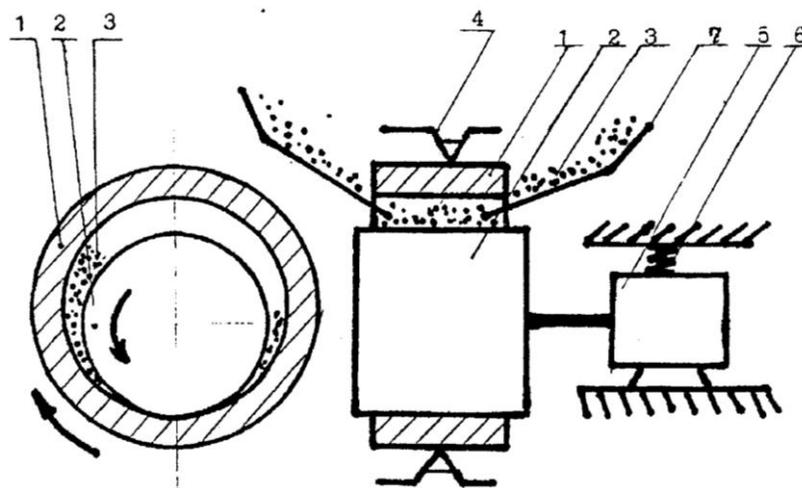


Рис. 2. Схема установки на износостойкость.

- 1- втулка, 2- резиновый ролик, 3- абразив, 4- крепеж,  
5- привод (электродеталь), 6- прижимная пружина, 7- лоток.

среднее арифметическое значение ( $q_U$  потери массы образцов исследуемых покрытий по формуле:

$$q_U = \frac{\sum_{i=1}^m q_{U_i}}{m}, \quad (8)$$

где:  $q_U$  - значение потерь массы диффузионного слоя при исследовании образцов - деталей, полученных при соответствующих термоциклической диффузии;  $m$  - количество исследуемых образцов.

В связи с применением хрома в диффузионной смеси можно ожидать, что данный элемент и его соединения в диффузионном слое вызовут более интенсивный износ сопрягаемого вала. Для проверки этой гипотезы были проведены испытания износостойкости восстановленных бронзовых втулок на машине трения С М Ц - 2 по схеме «диск - колодка» (рис. 3). Материал диска - сталь 40Х, которая применяется в сопряжении с бронзовыми втулками в опорных катках экскаватора. Образцы - колодки (рис.3.) были изготовлены из бронзы Бр.05Ц5С5 и Бр.АЖ9-4 как из исходного материала, так и с наращенным диффузионным слоем. Толщина диффузионного слоя выдерживалась в пределах  $1,0 \pm 0,02$  мм на сторону, при получении после термоциклической диффузии толщины  $1,2 \dots 1,3$  мм. Окончательный размер ( $1,0 \pm 0,02$  мм) достигался расточкой. Поверхностная твердость исходных материалов составляла: Бр.05Ц5С5 - 1400 МПа, Бр.АЖ9-4 - 2100 МПа. Поверхностная твердость восстановленной втулки из бронзы Бр.05Ц5С5 была 3800 МПа, у бронзы Бр.АЖ9-4 - 4150 МПа. Твердость материала диска (рис.8.3.) составила 42...45 HRC.

Рабочая площадь контакта колодки с диском составляла  $2 \text{ см}^2$ . Перед испытанием

машина трения была протарирована по нагрузке и моменту трения. Приработка образцов проходила при последовательном нагружении удельными нагрузками 2,5; 5,0; 7,5 Мн /м<sup>2</sup>. Окончание приработки определялась по стабилизации момента трения. Приработанные образцы промывались в бензине и просушивались на воздухе. Испытания на износ проводились при удельном давлении 3 МПа / м<sup>2</sup> и частоте вращения образца  $n = 300 \text{ мин}^{-1}$ . В качестве смазочной среды использовалось дизельное масло М8Б. Для ускорения процесса изнашивания в дизельное масло добавлялась кварцевая пыль (ГОСТ 8002-89) в количестве 5% с удельной поверхностью 5600 см<sup>2</sup> / г. Для поддержания абразива во взвешенном состоянии и предотвращения его оседания на дно ванны масло постоянно перемешивалось. Испытания проводились при граничном трении, что обеспечивалось подачей смазки в зону трения со скоростью 1 капля на 500 м пути трения. Величина износа определялась весовым методом. За сравнимую величину износа была принята относительная износостойкость, выраженная в процентах:

$$E = \frac{\Delta Q}{\Delta Q_0} \cdot 100\% , \quad (9)$$

где:  $\Delta Q_0$  - вес образца или контр образца до испытаний, мг;  $\Delta Q$  - вес образца или контр образца после испытаний, мг.

Потеря массы образцов и контр образцов определялась на аналитических весах модели АД-200. (рис. 4). Повторность экспериментов была 3-х кратная.

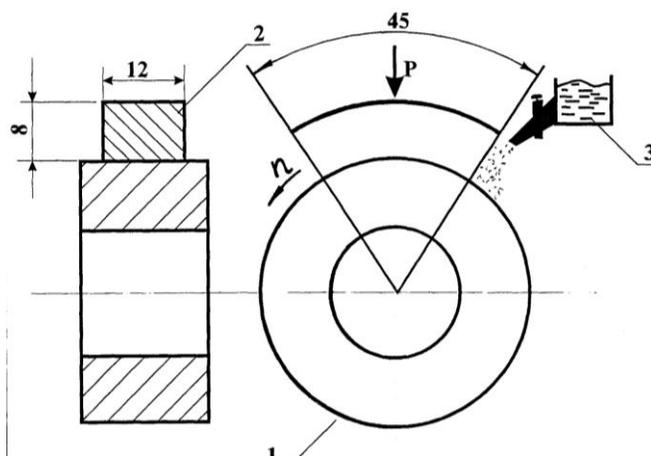


Рис. 3. Схема испытания образцов на износостойкость:  
1- диск (контробразец); 2-колодка (образец); 3- резервуар с дозирующим краном.

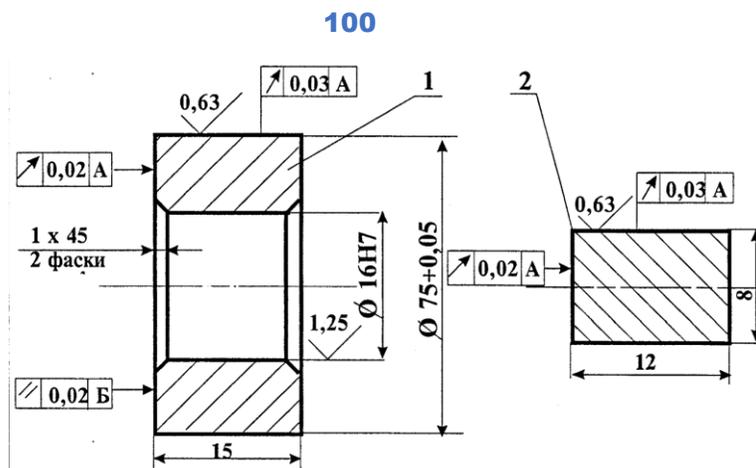


Рис. 4. Рабочий чертёж стального диска и образца: 1-диск, 2-образец.

### Выводы:

Применение диффузионной смеси, в состав которой входит железо - никелевый порошок ПР-Х18Н9 предпочтительно для восстановления деталей, имеющих износ только более 1,0 мм. Для величин износа деталей до 1,0 мм, естественно, его можно использовать, но, при этом, не будет повышение износостойкости восстановленной поверхности. Если эта задача не стоит, то данную диффузионную смесь можно успешно применять для ремонта цветных деталей.

### Библиографический список

1. Агафонов А. О. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники электроконтактной приваркой твердосплавных покрытий. /Автореф. дис. канд. тех. наук. Балашиха, 1990. - 22 с.
2. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика - М. Изд. «Наука» 1969. -824с.
3. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий. М.: Интер-мет Инжиниринг, 2004. – 624 с., ил.
4. Богоявленский К.Н., Жолобов В.В., Ландилов А.Д., Постников Н.Н. Обработка цветных металлов и сплавов давлением. - М.: Metallurgy, 1973.- 470 с.
5. Коваленко В.П., Лесной К.Я., Гусев С.С., Леонов И.Н. Использование ПГС – полимеров для очистки жидкостей в сельскохозяйственном производстве. / Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". 2003. № 1. С. 10.
6. Полухин П.И. Технология процессов обработки металлов давлением. М.: Metallurgy, 1988. 408 с.

7. Соколов К.О. Восстановление бронзовых подшипниковых втулок центробежным электродуговым напеканием бронзовых порошков. / Дисс. канд. техн. наук. - М., 1989. - 175 с.
8. Тойгамбаев С.К. Восстановление бронзовых втулок скольжения центробежной заливкой с применением электродугового нагрева. / Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2015. № 7. С. 28-32.
9. Тойгамбаев С.К. Совершенствование моечной машины ОМ-21614. / Тех-ника и технология. 2013. № 3. С. 15-188.
10. Тойгамбаев С.К. Технология производства транспортных и технологических машин природообустройства. / Учебник / Москва. 2020. 484с.
11. Тойгамбаев С.К. Повышение долговечности деталей сельскохозяйственных и мелиоративных машин при применении процесса термоциклической диффузионной металлизации. / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Российский государственный аграрный университет-Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева. Москва, 2000. С. 136.
12. Тойгамбаев С.К., Евграфов В.А. Исследования по оптимизации и эффективности использования машинно-тракторного парка предприятия. / Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2016. № 5. С. 28-33.
13. Тойгамбаев С.К., Апатенко А.С. Обработка результатов информации по надежности транспортных и технологических машин методом математической статистики. / Методическое указание. Изд. «Мегаполис» Москва, 2020. С. 25.е указание. Изд. «Мегаполис» Москва, 2020. С. 25.