



Оценка технического состояния силовых гидроцилиндров серии С навесных гидросистем тракторов

С. А. Величко¹, П. В. Чумаков^{1*}, А. В. Коломейченко²

¹ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

²ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ» (г. Орёл, Россия)

*pav-chumakov@yandex.ru

Введение. Существующие методы оценки технического состояния силовых гидроцилиндров не позволяют делать заключение о необходимости восстановления изношенных поверхностей деталей. При этом данные о предельных значениях износов деталей (значений износов, при достижении которых принимается решение о ремонте) в технических требованиях на капитальный ремонт и другой технической документации гидроцилиндров в настоящее время отсутствуют. Целью работы является определение предельных значений износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров серии С.

Материалы и методы. Для оценки технического состояния гидроцилиндров применяется разработанное устройство на базе стенда КИ-28097М-ГОСНИТИ, состоящее из нагрузочного гидроцилиндра и независимой гидростанции, при помощи которых проводились стендовые испытания бывших в эксплуатации гидроцилиндров серии С с определением значений общего коэффициента полезного действия.

Результаты исследования. Представлены результаты стендовых и микрометражных исследований бывших в эксплуатации гидроцилиндров серии С (С75/30, С90/30, С100/40). Получена регрессионная модель связи общего коэффициента полезного действия гидроцилиндров серии С (С75/30, С90/30, С100/40) с износами рабочих поверхностей деталей. По полученной регрессионной модели методом крутого восхождения определены предельные значения износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров серии С (С75/30, С90/30, С100/40).

Обсуждение и заключение. Установлено, что 19,5 % гидроцилиндров серии С (С75/30, С90/30, С100/40) эксплуатировались в запредельном состоянии. Предельные значения износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров серии С, которые определены методом крутого восхождения, в условиях предприятий технического сервиса при проведении входного контроля поступивших в ремонт гидроцилиндров позволяют принимать решение о необходимости их восстановления.

Ключевые слова: гидроцилиндр, коэффициент полезного действия, техническое состояние, микрометраж, износ

Финансирование: Публикация подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России (госзадание, направление: развитие компетенций, проект № 11.3416.2017/4.6) «Разработка технологий и средств повышения долговечности деталей, узлов, агрегатов машин и оборудования путем создания наноструктурированных покрытий источниками концентрированной энергии».

Для цитирования: Величко С. А., Чумаков П. В., Коломейченко А. В. Оценка технического состояния силовых гидроцилиндров серии С навесных гидросистем тракторов // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 396–413. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.396-413>

© Величко С. А., Чумаков П. В., Коломейченко А. В., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Assessment of Technical Condition of C Series Power Hydraulic Cylinders of Mounted Hydraulic Systems of Tractors

S. A. Velichko¹, P. V. Chumakov^{1*}, A. V. Kolomeychenko²

¹National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

²Orel State Agrarian University (Orel, Russia)

*pav-chumakov@yandex.ru

Introduction. The existing methods of assessing the technical condition of power hydraulic cylinders do not allow one to conclude about the need to restore worn surfaces of parts. The data on limit values of wear of parts (wear and tear value at which a decision is made to repair) in technical requirements to overhaul and other technical documentation of hydraulic cylinders are not currently available. The aim of the study is to determine limit values of wear of working surfaces of hydraulic cylinder parts of C series.

Materials and Methods. To assess the technical condition of hydraulic cylinders used, the authors developed a device on the basis of the stand KI-28097M-GOSNITI, equipped with an independent hydraulic station and load hydraulic cylinder, at which bench tests were carried out in the operation of C series hydraulic cylinders to determine overall efficiency values.

Results. Results of bench and micrometer tests of the former hydraulic cylinders of the C series (C75/30, C90/30, C100/40) are presented. The regression model of the relationship between total efficiency of C series hydraulic cylinders (C75/30, C90/30, C100/40) and wear of working surfaces of parts was obtained. According to this regression model obtained using the method of steep ascent, limit values of wear of the working surfaces of C series hydraulic cylinder parts (C75/30, C90/30, C100/40) were determined.

Discussion and Conclusion. 19,5 % of hydraulic cylinders of C series (C75/30, C90/30, C100/40) were operated in an out-of-limit condition. In case of technical service companies carrying out the input control of to-be-repaired hydraulic cylinders, limit values of wear for hydraulic cylinder surfaces, determined by the method of steep ascent, allow for making proper decisions on the need of their restoration.

Keywords: hydraulic cylinder, efficiency factor, technical condition, micrometer, wear

Funding: The publication was prepared with the financial support of the Ministry of Education of Russia, State Assignment: Competency Development, Project No. 11.3416.2017/4.6: Development of Technologies and Means of Enhancing Durability of Parts, Components, Assemblies of Machinery and Equipment by Creating Nanostructured Coatings by Concentrated Energy Sources.

For citation: Velichko S.A., Chumakov P.V., Kolomeychenko A.V. Assessment of Technical Condition of C Series Power Hydraulic Cylinders of Mounted Hydraulic Systems of Tractors. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):396-413. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.396-413>

Введение

Одним из агрегатов гидравлических систем современных отечественных и зарубежных тракторов является силовой гидроцилиндр, назначение которого заключается в преобразовании энергии рабочей жидкости, создаваемой насосом, в энергию возвратно-поступательного движения. При этом создаваемое возвратно-поступательное

движение позволяет применять гидроцилиндр для перемещения прицепных и навесных рабочих органов машин.

В работе Е. В. Гранкиной установлено, что «около 6...15 % отказов гидронавесной системы новых сельскохозяйственных тракторов тягового класса 1,4 и 3,0 связано с выходом из строя гидроцилиндров, из которых 42...45 % случаев обусловлены неисправностями

уплотнительных узлов – 52 % отказов штокового узла и 40 % – поршневого»¹. 80-процентный гамма-ресурс гидроцилиндров серии в 1,5 раза ниже ресурса, заявленного заводом-изготовителем и составляет 6000 мото-часов работы трактора [1].

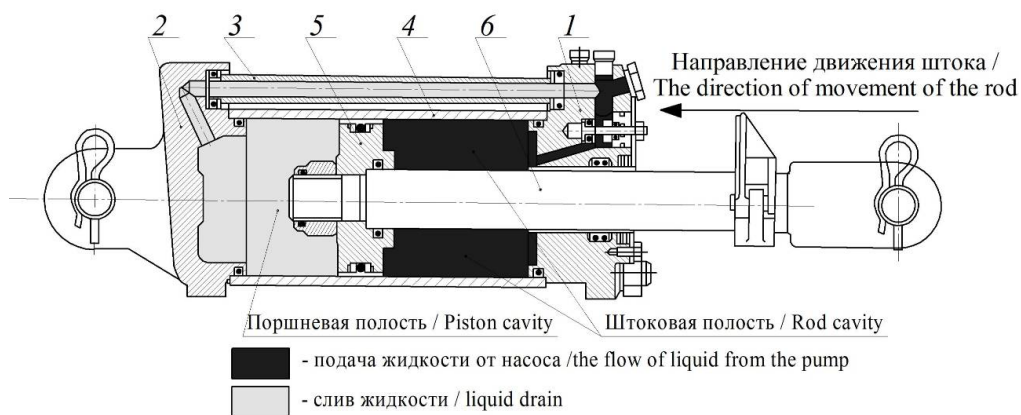
В настоящее время в современных гидроприводах отечественного производства широкое распространение нашли поршневые гидроцилиндры двухстороннего действия серии С (С75/30, С90/30, С100/40), которые имеют идентичную конструкцию, но различаются размерами диаметров штоков, гильз и поршней.

Рассмотрим принцип работы гидроцилиндров (рис. 1).

В процессе работы гидроцилиндра происходит поступательное перемещение штока 6 и поршня 5 относительно гильзы 4 и передней крышки 1 за счет создаваемого насосом давления масла в штоковой полости (рис. 1). При этом на детали гидроцилиндра действуют осевая и радиальная нагрузки, в результате чего происходит износ сопрягаемых

поверхностей узлов. Согласно исследованиям отечественных и зарубежных ученых погнутость штока, износы рабочих поверхностей деталей поршневого и штокового узлов приводят к смещению оси поршня и штока относительно оси передней крышки и гильзы, вследствие чего снижается коэффициент полезного действия гидроцилиндра [2–5].

В настоящее время для восстановления изношенных поверхностей деталей гидроагрегатов широко используется метод электроискровой обработки [6–8], который позволяет получать металлопокрытия с требуемыми физико-механическими свойствами [2; 8]. При этом ресурс отремонтированных с применением электроискровой наплавки гидроагрегатов не ниже ресурса новых агрегатов [1; 9; 10]. Однако недостатком метода электроискровой обработки является ограничение по толщине полученных покрытий [11; 12]. Поэтому, с целью выявления необходимости восстановления деталей и выбора рациональных режимов нанесения покрытий, необходимы данные о допустимых



Р и с. 1. Принцип работы гидроцилиндра серии С: 1 – передняя крышка; 2 – задняя крышка; 3 – маслопровод; 4 – гильза; 5 – поршень; 6 – шток

F i g. 1. The principle of operation of a C series hydraulic cylinder: 1 – front cover; 2 – rear cover; 3 – oil line; 4 – sleeve; 5 – piston; 6 – rod

¹ Гранкина Е. В. Обеспечение работоспособности штоковых уплотнительных узлов при ремонте гидроцилиндров путем применения рационального способа восстановления штока: дис. канд. ... техн. наук. Л., 1989. 158 с.

значениях износов их рабочих поверхностей. То есть тех значений износов, при достижении которых коэффициент полезного действия гидроцилиндра соответствует допустимому значению и его дальнейшая эксплуатация невозможна. Однако в технических требованиях на капитальный ремонт и другой технической документации данные о допустимых значениях износов деталей гидроцилиндров в настоящее время отсутствуют.

Целью работы является определение допустимых значений износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров серии С.

Обзор литературы

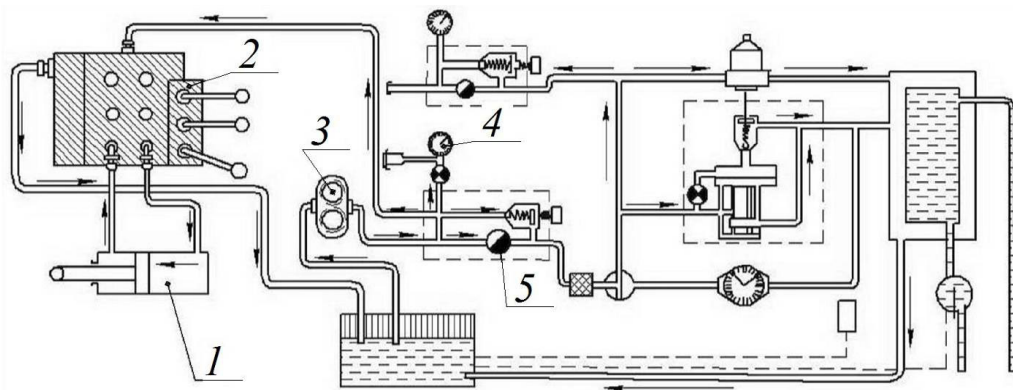
В ремонтном производстве важнейшей задачей является оценка технического состояния и определение значений функциональных параметров работоспособности гидроцилиндров.

В исследованиях ряда ученых² представлен способ оценки технического

состояния по параметрам герметичности уплотнительных узлов гидроцилиндров на стенде КИ-4815М (рис. 2).

Оценка параметров герметичности штокового и поршневого уплотнительных узлов гидроцилиндра осуществляется при установке и неподвижном закреплении поршня в среднее или в крайнее положение. Рукав поршневой полости масляной магистрали, отсоединенный от гидрораспределителя, опускают в мерный стакан. При помощи дросселя стенда проводят установку давления в штоковой полости гидроцилиндра равную 100 кгс/см². Утечки масла через поршневое и штоковое уплотнительные соединения собирают в мерную колбу. Исследования показали, что оценка технического состояния гидроцилиндров описанным способом применима только в случае нарушения целостности уплотнителей³.

Известен метод оценки технического состояния гидроцилиндров примене-



Р и с. 2. Схема испытания гидроцилиндров на герметичность:
1 – гидроцилиндр; 2 – распределитель; 3 – насос; 4 – манометр; 5 – дроссель

F i g. 2. Scheme of testing of a hydraulic cylinder for tightness:
1 – hydraulic cylinder; 2 – distributor; 3 – pump; 4 – pressure gauge; 5 – throttle

² Ачкасов К. А., Вегера В. П. Ремонт приборов системы питания и гидравлической системы тракторов, автомобилей и комбайнов: учебник. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высш. школа, 1981. 288 с.; Черкун В. Е. Ремонт тракторных гидравлических систем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1984. 253 с.

³ Бурмукулов Ф. Х., Величко С. А., Чумаков П. В. Анализ причин потери работоспособности силовых цилиндров гидросистем тракторов / Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем // Материалы Всерос. научн.-техн. конф., 19–23 окт. 2009 г. / редкол.: П. В. Сенин [и др.]. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. С. 23–25. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28903621> (дата обращения: 20.05.2019).

нием сжатого воздуха⁴, который состоит из следующих этапов:

– при помощи тягового гидроцилиндра поршень диагностируемого цилиндра устанавливают в крайнее положение;

– поршню диагностируемого гидроцилиндра с помощью распределителя придается возвратно-поступательное движение;

– в диагностируемой полости гидроцилиндра устанавливают необходимое давление воздуха. Заполнение диагностируемой полости воздухом происходит через блок обратных клапанов;

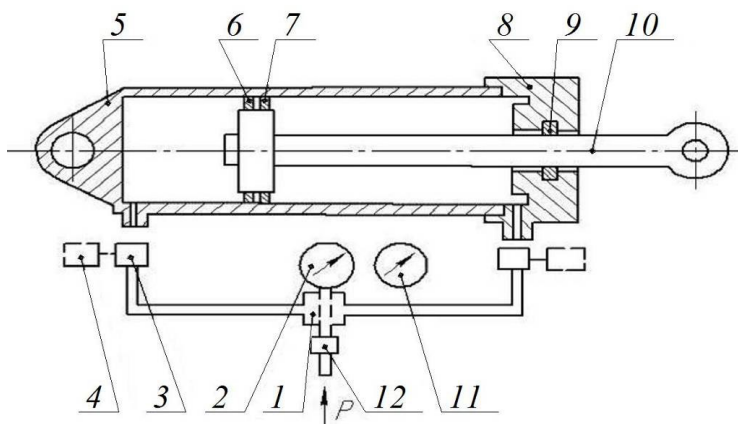
– во время движения штока в сторону уменьшения объема диагностируемой полости гидроцилиндра воздух через редукционный клапан и блок обратных клапанов поступает на газовый счетчик;

– по истечении установленного количества циклов (полных ходов штока) фиксируется показание счетчика. По разности из полученного значения

показаний первоначального счетчика судят о техническом состоянии гидроцилиндра.

Способ оценки герметичности уплотнительных узлов гидроцилиндров по скорости утечки из рабочих полостей воздуха описан Д. Ю. Кобзовым, С. В. Усовой: «прибор (рис. 3) содержит распределитель воздуха 1, который имеет один входной канал, связанный через обратный клапан 12 с воздушной магистралью, и три выходных канала, соединяемые с контролируемой рабочей полостью гидроцилиндра, заглушкой 4 и манометром 2. Для контроля герметичности уплотнений прибор подключают поочередно к полостям гидроцилиндра. Время падения давления воздуха от 0,30 до 0,25 МПа не должно быть менее 60 с» [13].

Данный способ не позволяет достаточно точно оценивать герметичность уплотнительных узлов, из-за того что поршневая и штоковая полости гидроцилиндра имеют совершенно разные



Р и с. 3. Схема контроля герметичности уплотнений по скорости утечки воздуха:

- 1 – распределитель воздуха; 2 – манометр; 3, 4 – заглушки и штуцеры; 5, 8, 10 – корпус, передняя крышка и шток гидроцилиндра; 6, 7, 9 – уплотнительные манжеты; 11 – секундомер; 12 – обратный клапан

F i g. 3. Scheme of leakage control seals for leak rate of air:

- 1 – air distributor; 2 – pressure gauge; 3, 4 – replaceable fittings and plugs; 5, 8, 10 – hull, the cover and the rod of the hydraulic cylinder; 6, 7, 9 – sealing cuffs; 11 – time indicator; 12 – check valve

⁴ Ереско С. П. Система управления надежностью уплотнений подвижных соединений гидроагрегатов строительных машин: дис... д-ра техн. наук. Красноярск, 2003. 425 с.

объемы. Значит, объем заполняемого воздуха, а соответственно и время падения давления будут разными при одном и том же уплотнительном узле.

В ГОСТе 18464–96 и типовой программе приемо-сдаточных испытаний ПИ-00100102.00.00.01, разработанной крупнейшим производителем гидроагрегатов в стране ЗАО «Гидросила», представлена методика и условия оценки технического состояния по удельному объему рабочей жидкости, выносимой поверхностью штока, и общему коэффициенту полезного действия гидроцилиндра во время движения поршня при номинальных тяговом, или тянущем, усилии и давлении.

Анализ показал, что существующие методы оценки технического состояния силовых гидроцилиндров не дают возможности находить их функциональные параметры работоспособности соответствующими ГОСТу 16514–96.

Оценка технического состояния деталей гидроцилиндров определением угла несоосности штока и гильзы позволяет оценивать нарушение работоспособности гидроцилиндров, вызванное износом сопрягаемых деталей, но никак не выявляет дефекты на рабочих поверхностях⁵. Так же угол несоосности штока и гильзы невозможно определить при погнутом штоке [14].

Рассмотренные выше способы не дают точной оценки технического состояния гидроцилиндров. Об этом говорит и тот факт, что испытания проводятся в неподвижном положении и без силовой нагрузки испытуемого гидроцилиндра.

Материалы и методы

В соответствии с ГОСТом 16514–96, критерием предельного состояния гидроцилиндров принято «снижение общего коэффициента полезного действия не более чем на 20 % и увеличение удельного объема выносимой рабочей жидкости более чем в 1,2 раза от установленного значения»⁶. Для гидроцилиндров серии С предельное расчетное значение общего коэффициента полезного действия составило 0,728.

С целью оценки технического состояния гидроцилиндров с учетом требований ГОСТа 16514–96, разработано устройство на базе стенда КИ-28097М-ГОСНИТИ, оснащенное нагрузочным гидроцилиндром и независимой гидростанцией. При помощи данного устройства по методике, представленной в нашей работе⁷, проводились стендовые испытания бывших в эксплуатации гидроцилиндров серии С с определением значений общего коэффициента полезного действия $\eta_{\text{ц}}$. Испытания проводились на индустриальном масле марки И-20, имеющем при температуре 50 °С вязкость (60...70) 10⁻⁶ м²/с. Температура масла при испытании составляла 50±5 °С.

Микрометражным исследованием подвергались рабочие поверхности следующих деталей гидроцилиндров: шток, поршень, передняя крышка, гильза [1].

Результаты исследования

По результатам стендовых испытаний технического состояния гидроцилиндров моделей С75, С90 и С100 составлены вариационные ряды значений общего коэффициента полезного

⁵ Бурумкулов Ф. Х., Величко С. А., Чумаков П. В. Анализ причин потери работоспособности силовых цилиндров гидросистем тракторов / Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем // Материалы Всерос. научн.-техн. конф., 19–23 окт. 2009 г. / редкол.: П. В. Сенин [и др.]. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2009. С. 23–25.

⁶ ГОСТ 16514–96. С 6.

⁷ Чумаков П. В., Величко С. А. Совершенствование устройства для оценки технического состояния силовых гидроцилиндров в условиях предприятий технического сервиса АПК / Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы // Межвузовский сборник научных трудов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 284–289.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Параметры статистики выборок общего коэффициента полезного действия гидроцилиндров
Statistic parameters of samples of total efficiency factor of hydraulic cylinders

Модель гидроцилиндра / Model of the hydraulic cylinder	N	\bar{X}	σ	Диапазон значений / Range of values		P_w
				X_{max}	X_{min}	
C75	60	0,760	0,073	0,822	0,476	0,0000
C90	60	0,764	0,075	0,822	0,510	0,0000
C100	60	0,766	0,063	0,823	0,572	0,0000

действия. Результаты статистической обработки вариационных рядов общего коэффициента полезного действия представлены в таблице 1 отдельно для каждой группы моделей гидроцилиндров.

Проверка групп измерений на нормальность показала (табл. 1), что для исследуемых моделей гидроцилиндров показатель уровня значимости критерия Шапиро – Уилка $p_w < 0,05$. Это отвергает нулевую гипотезу о нормальном распределении значений выборок общего коэффициента полезного действия.

Результат сравнения выборок на расходимость показывает, что уровень значимости KW -критерия $p_{KW} = 0,8303$ больше $p = 0,05$, следовательно, гипотеза их расхождения отвергается, и все исследуемые выборки относятся к одной генеральной совокупности.

В таблице 2 представлены параметры закона распределения Вейбулла объединенной выборки общего коэффициента полезного действия гидроцилиндров.

Из рисунка 4 видно, что по параметру общего коэффициента полезного действия 19,5 % гидроцилиндров эксплуатировались в запредельном состоянии.

Номинальные размеры исследуемых рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров серии С представлены в таблице 3.

Значения износов определялись величиной выхода действительного размера поверхностей деталей гидроцилиндров за пределы поля допуска номинального размера.

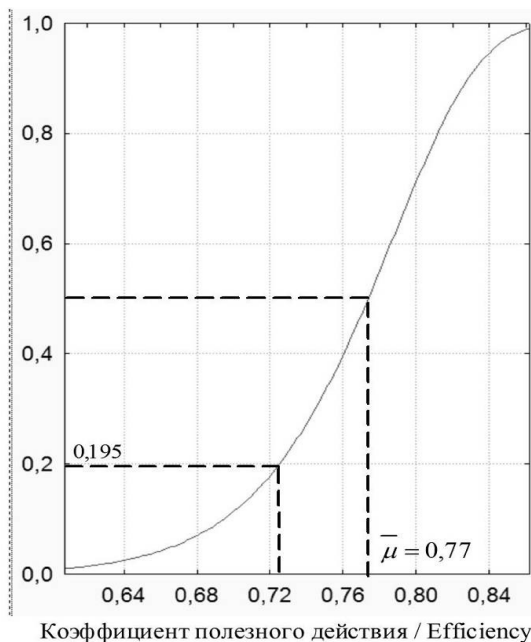
Результаты статистической обработки вариационных рядов износов де-

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Параметры закона распределения Вейбулла общего коэффициента полезного действия гидроцилиндров

Parameters of the Weibull distribution of the total efficiency factor of hydraulic cylinders

Математическое ожидание двухпараметрической функции / Expectation of a two-parameter function	μ	0,77
Параметры закона распределения Вейбулла / Parameters of the Weibull distribution	α	17,52
	b	0,79
Критерий Холландера – Прошана / Hollander – Proshan Criterion	P_{HP}	0,1046



Р и с. 4. Функция распределения общего коэффициента полезного действия
 F i g. 4. Distribution function of the total efficiency factor

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

Номинальные размеры исследуемых поверхностей деталей гидроцилиндров серии C
Nominal dimensions of the investigated surfaces of C series hydraulic cylinder parts

Деталь гидроцилиндра / Detail of the hydraulic cylinder	Износы и дефекты поверхностей / Surface wear and defects	Размеры деталей по чертежу для моделей гидроцилиндров / Dimensions of parts according to the drawing for models of hydraulic cylinders		
		C75	C90	C100
Передняя крышка гидроцилиндра / Front cover of the hydraulic cylinder	Износ внутренней поверхности, сопрягаемой со штоком / Wear of the inner surface to be mated with the rod	Ø30 ^{+0,052}		Ø40 ^{+0,052}
Шток / Rod	Износ наружной поверхности / Wear of the outer surface	Ø30 ^{-0,025} _{-0,085}		Ø40 ^{-0,032} _{-0,100}
	Прогиб / Deflection	не более 0,1 мм / not more than 0,1 mm		
Гильза гидроцилиндра / Hydraulic cylinder liner	Износ внутренней поверхности / Wear of the inner surface	Ø75 ^{+0,06}	Ø90 ^{+0,07}	Ø100 ^{+0,035}
Поршень / Piston	Износ наружной поверхности, сопрягаемой с гильзой гидроцилиндра / Wear of the outer surface to be mated with the cylinder liner	Ø75 ^{-0,03} _{-0,06}	Ø90 ^{-0,04} _{-0,075}	Ø100 ^{-0,04} _{-0,075}

талей отдельно для каждой группы моделей гидроцилиндров представлены в таблице 4.

Из таблицы 4 видно, что показатель уровня значимости критерия Шапиро – Уилка для исследуемых вариационных рядов износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров $p_w < 0,05$. Это отвергает нулевую гипотезу о нормальном распределении значений износов в выборках.

Таким образом, для анализа исследуемых выборок на расходимость в изучаемых моделях гидроцилиндров C75, C90, C100, воспользуемся KW -критерием. Результаты оценки представлены в таблице 5.

Представленная в таблице 5 оценка выборок на расходимость показала, что уровень значимости критерия Краскела – Уоллиса более 0,05, то есть нулевая гипотеза их расхождения отвергается,

Т а б л и ц а 4

Параметры статистики выборок износов деталей гидроцилиндров

Наименование детали гидроцилиндра	\bar{X}	Диапазон износа		σ	p_w
		X_{\max}	X_{\min}		
C75					
Износ отверстия под шток передней крышки, мкм	188,58	86	728	118,03	0,00000
Погнутость штока, мкм	729,13	130	2000	516,50	0,0002
Износ наружной поверхности штока, мкм	14,53	6	24	4,61	0,0082
Износ внутренней поверхности гильзы цилиндра, мкм	66,68	24	164	30,33	0,0003
Износ наружной поверхности поршня, мкм	103,33	40	235	54,39	0,000004
C90					
Износ отверстия под шток передней крышки, мкм	234,0	90	722	162,52	0,00000
Погнутость штока, мкм	771,07	148	2000	500,10	0,0014
Износ наружной поверхности штока, мкм	15,67	6	24	4,96	0,0254
Износ внутренней поверхности гильзы цилиндра, мкм	65,97	46	158	25,44	0,00000
Износ наружной поверхности поршня, мкм	111,16	52	230	53,20	0,000004
C100					
Износ отверстия под шток передней крышки, мкм	235,93	90	90–724	147,18	0,00000
Погнутость штока, мкм	600,6	120	2000	415,39	0,0001
Износ наружной поверхности штока, мкм	15,87	8	24	5,02	0,0005
Износ внутренней поверхности гильзы цилиндра, мкм	64,33	40	155	24,44	0,0000008
Износ наружной поверхности поршня, мкм	116,07	30	242	58,46	0,00001

Table 4

Statistic parameters of samples of hydraulic cylinder parts wear

Name of hydraulic cylinder part	\bar{X}	Wear range		σ	P_W
		X_{\max}	X_{\min}		
C75					
Wear the holes for the stock front cover, μm	188,58	86	728	118,03	0,00000
The curvature of the rod, μm	729,13	130	2000	516,50	0,0002
Wear of the outer surface of the rod, μm	14,53	6	24	4,61	0,0082
Wear of the inner surface of the cylinder, μm	66,68	24	164	30,33	0,0003
Wear the outer surface of the piston, μm	103,33	40	235	54,39	0,000004
C90					
Wear the holes for the stock front cover, μm	234,0	90	722	162,52	0,00000
The curvature of the rod, μm	771,07	148	2000	500,10	0,0014
Wear of the outer surface of the rod, μm	15,67	6	24	4,96	0,0254
Wear of the inner surface of the cylinder, μm	65,97	46	158	25,44	0,00000
Wear the outer surface of the piston, μm	111,16	52	230	53,20	0,000004
C100					
Wear the holes for the stock front cover, μm	235,93	90	90–724	147,18	0,00000
The curvature of the rod, μm	600,6	120	2000	415,39	0,0001
Wear of the outer surface of the rod, μm	15,87	8	24	5,02	0,0005
Wear of the inner surface of the cylinder, μm	64,33	40	155	24,44	0,0000008
Wear the outer surface of the piston, μm	116,07	30	242	58,46	0,00001

Таблица 5

Table 5

Результаты сравнения выборок на расходимость по KW -критерию
The results of the comparison of samples for divergence on KW -criterion

Исследуемые выборки / The study sample	Уровень значимости KW -критерия / The significance level KW -criterion
Износ отверстия передней крышки U_{PC}^* , мкм / The wear holes on the front cover U_{PC}^* , μm	0,0844
Износ штока U_{ST}^* , мкм / Wear of the outer surface of the rod U_{ST}^* , μm	0,3087
Погнутость штока g_{ST}^* , мкм / Curvature of the rod g_{ST}^* , μm	0,1971
Износ гильзы U_G^* , мкм / Wear of the liner U_G^* , μm	0,8128
Износ поршня U_P^* , мкм / Wear of the piston U_P^* , μm	0,3274

соответственно все они принадлежат одной генеральной совокупности.

Параметры дескриптивной статистики, законы распределения Вейбулла и критерий качества подгонки (*HP*) выборок износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров представлены в таблице 6.

Для проведения регрессионного анализа принята выборка гидроцилиндров, у которых по результатам стендовых испытаний установлено значение общего коэффициента полезного действия (зависимая переменная) и со-

ответствующие ему износы рабочих поверхностей деталей (независимые переменные). Количество гидроцилиндров исследуемых моделей выбрано в равном процентном соотношении, беря во внимание, что число наблюдений должно быть больше числа предикторов в 10 раз. Проверку однородности выборок зависимой и независимых переменных проводили по критерию Манна – Уитни.

В таблице 7 представлены результаты статистической обработки вариационных рядов зависимой перемен-

Таблица 6
Table 6

Статистические характеристики объединенных выборок износов деталей гидроцилиндров
Statistic characteristics of the merged samples, wear parts of hydraulic cylinders

Обобщенные выборки / Generalized samples	X	Диапазон износа / Wear range		σ	Параметры закона Вейбулла / Parameters of the Weibull distribution		μ	P_{HP}	
		X_{max}	X_{min}		α	b			
U_{PC}^*	219,7	86	728	144,7	248,7	1,7	200,5	0,2906	
U_{ST}^*		15,4	6	24	4,9	17,1	3,5	15,4	0,6225
g_{ST}^*		700,3	120	2000	482,5	780,3	1,52	613,1	0,6889
U_G^*		65,7	24	164	26,7	74,04	2,6	64,3	0,3232
U_P^*		110,2	30	242	55,3	125,2	2,2	106,0	0,3594

Таблица 7
Table 7

Параметры дескриптивной статистики и оценка однородности выборок зависимой и независимых переменных

Parameters of descriptive statistics and evaluation of uniformity of samples of dependent and independent variables

Обобщенные выборки / Generalized samples	N	\bar{X}	Диапазон износа / Wear range		σ	p_U
			X_{max}	X_{min}		
U_{ST}	60	13,8	6	24	4,16	0,0615
U_{PC}		208,3	86	728	145,9	0,1687
U_P		105,1	30	242	56,3	0,4012
U_G		66,9	24	164	30,2	0,9555
g_{ST}		728,1	120	2000	510,8	0,8183
η_C		0,764	0,476	0,823	0,073	0,9136

ной – коэффициент полезного действия гидроцилиндра η_C – и независимых: износ отверстия передней крышки U_{PC} , мкм; износ штока U_{ST} , мкм; погнутость штока g_{ST} , мкм; износ внутренней поверхности гильзы U_G , мкм; износ наружной поверхности поршня U_P , мкм.

Из таблицы 7 видно, что для всех сформированных для регрессионного анализа выборок уровень значимости критерия Манна – Уитни p_U больше принятого 5-процентного уровня, следовательно, все выборки однородны и взяты из соответствующих им генеральных совокупностей.

Тогда, уравнение линейной множественной регрессии в натуральном масштабе запишем в виде:

$$\eta_C = \beta_0 + \beta_1 \cdot U_{ST} + \beta_2 \cdot U_{PC} + \beta_3 \cdot U_P + \beta_4 \cdot U_G + \beta_5 \cdot g_{ST}. \quad (1)$$

Корреляционный анализ модели 1 показал, что коэффициент множественной корреляции между переменными имеет значение $R = 0,999$, а коэффициент детерминации $R^2 = 0,998$ ($\bar{R}^2 = 0,998$). В связи с чем можно утверждать, что полученное регрессион-

ное уравнение объясняет 99 % разброса значений общего коэффициента полезного действия относительно среднего значения.

В таблице 8 приведены значения попарных коэффициентов корреляции между факторами.

Согласно данным таблицы 8, функциональная связь между независимыми переменными отсутствует. По этой причине все независимые переменные включаются в многофакторный регрессионный анализ.

Согласно оценке коэффициентов уравнения (1) по методу наименьших квадратов, все независимые переменные статистически значимы, поэтому они приняты для дальнейшего анализа.

Проведенный многофакторный регрессионный анализ показал, что коэффициенты статистической связи между зависимой переменной и всеми независимыми имеют значения, соответствующие представленным в таблице 9.

Из таблицы 9 видно, что у фактора «износ штока U_{ST} » уровень значимости текущего значения t -критерия Стьюдента (p_i) выше принятого значения $p_i = 0,05$, откуда следует, что он статистически значительно не оказывает

Таблица 8

Table 8

Значения попарных коэффициентов корреляции между факторами
The values of pairwise correlation coefficients between the factors

Множественная корреляция / Multiple correlation	Коэффициенты попарной корреляции / The coefficients of pairwise correlations					
Факторы / factors	U_{ST}	U_{PC}	U_P	U_G	g_{ST}	η_C
U_{ST}	1,000000	-0,099771	-0,018331	-0,060578	-0,023003	0,106387
U_{PC}	-0,099771	1,000000	0,947543	0,962480	0,951520	-0,997452
U_P	-0,018331	0,947543	1,000000	0,983074	0,990915	-0,928723
U_G	-0,060578	0,962480	0,983074	1,000000	0,984855	-0,952146
g_{ST}	-0,023003	0,951520	0,990915	0,984855	1,000000	-0,934201
η_C	0,106387	-0,997452	-0,928723	-0,952146	-0,934201	1,000000

Коэффициенты связи между зависимой переменной и независимыми
Relationship coefficients between the dependent variable and the independent variables

N = 60	Множественный регрессионный анализ: зависимая величина (η_C) / Multiple regression analysis: dependent quantity (η_C); $R = 0,999$; $R^2 = 0,998$; $F = 6406,9$; $S_{\bar{v}/\Sigma z} = 0,00315$					
	b_i	Ст. ош. b_i	β_i	Ст. ош. β_i	$t(107)$	p_i -уровень / p_i -level
Свободный член β_0 / Free member β_0	–	–	0,874752	0,002763	316,5689	0,000000
U_{ST}	-0,01067	0,005753	-0,000188	0,000101	-1,8554	0,069001
U_{PC}	-1,12045	0,020022	-0,000563	0,000010	-55,9606	0,000000
U_P	0,21128	0,043784	0,000275	0,000057	4,8255	0,000012
U_G	-0,18697	0,036621	-0,000455	0,000089	-5,1054	0,000004
g_{ST}	0,10631	0,044861	0,000015	0,000006	2,3698	0,021398

Примечание: полужирным шрифтом выделены значимые факторы / Note: significant factors are highlighted in bold

влияние на зависимую переменную – коэффициент полезного действия гидроцилиндра.

В результате математическая модель зависимости общего коэффициента полезного действия гидроцилиндров от статистически значимых, независимых факторов имеет вид:

$$\eta_C = 8,75 \cdot 10^{-1} - 5,63 \cdot 10^{-4} \cdot U_{PC} + 2,75 \cdot 10^{-4} \cdot U_P - 4,55 \cdot 10^{-4} \cdot U_G + 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot g_{ST}. \quad (2)$$

Проверка по критерию Фишера показала, что расчетное значение $F = 6649,1$ больше критического $F_{кр} = 5,54$, а уровень значимости $p_F = 0,0000$, следовательно, полученная регрессия (2) высоко значима и по данному критерию адекватно описывает статистическую связь исследуемых факторов.

Стандартная ошибка оценки, или мера рассеяния экспериментальных значений относительно регрессионной прямой, $S_{\bar{v}/\Sigma z} = 0,00309$ меньше, чем 5 % от среднего значения функции отклика равного 0,0382.

Оценка остатка по критерию Дарбина – Уотсона показала, что $d = 1,87$; $p_{DU} = 0,017$. В этом случае проверяется гипотеза: остатки независимы, то есть $\rho = 0$, против альтернативы $\rho < 0$.

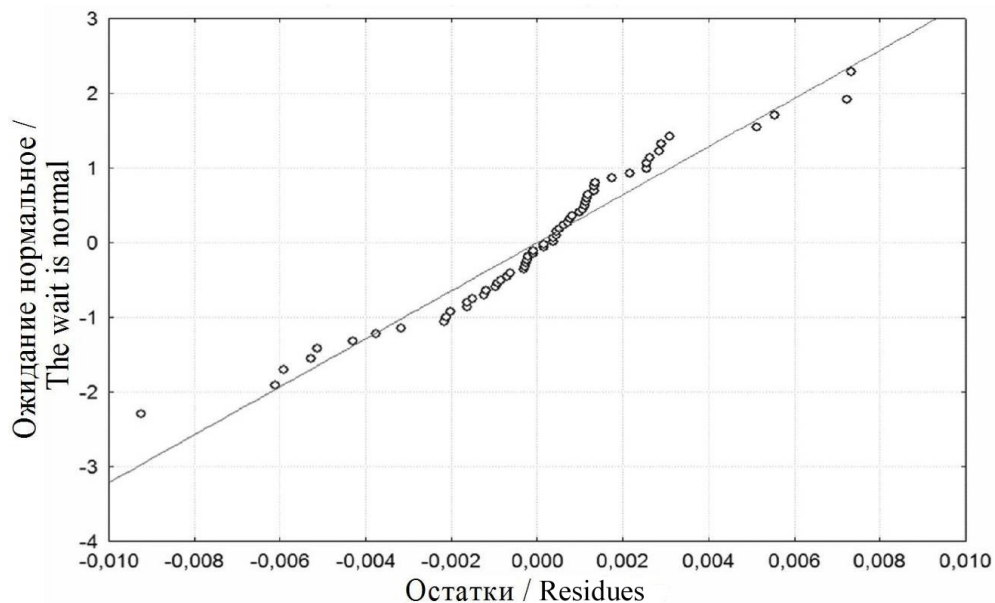
Так как $d = 1,87 > DU - 3(d_{кр}) = 1,73$, то гипотеза о независимости остатков регрессионной модели (2) на 5-процентном уровне не отвергается.

Для дальнейшей проверки адекватности модели (2) рассмотрим график распределения остатков (рис. 5), из которого видно, что они достаточно хорошо аппроксимируются нормальным распределением.

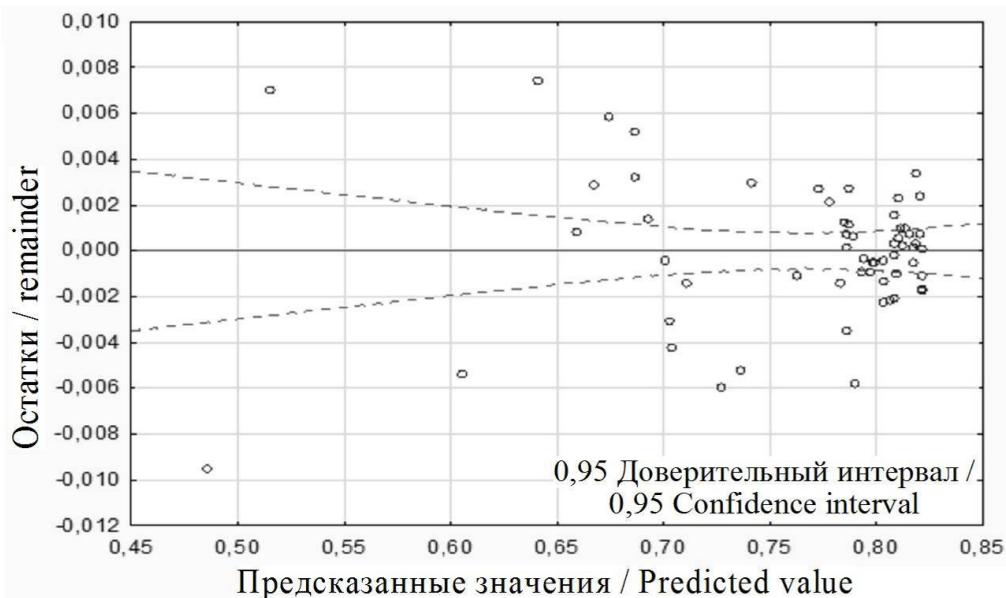
При этом видно (рис. 6), что остатки хаотично разбросаны, слабо коррелированы между собой, в их поведении нет закономерности.

Таким образом, по совокупности исследованных критериев математическая модель (2) вполне адекватно описывает наблюдаемую статистическую связь коэффициента полезного действия гидроцилиндров с износами деталей и погнутостью штока.

Проверка модели (2) по среднему значению показала, что расчетное зна-



Р и с. 5. График нормального распределения остатков функции отклика
 F i g. 5. Graph of the normal distribution of residues of response function



Р и с. 6. Экспериментальные величины остатков и удаленных остатков
 F i g. 6. Experimental values of the residuals and the remote residues

чение $\eta_c = 0,766$ меньше среднего значения функции отклика ($\eta_c = 0,7664$), полученного экспериментально, не более чем на 0,5 %.

Анализ значений стандартизованного коэффициента регрессии статистически значимых факторов по модулю $|b_i|$ показал, что наибольшее влияние на коэффициент полезного действия гидроцилиндра оказывает износ поверхности отверстия передней крышки ($b_i = |1,11528|$). Степень влияния износов рабочих поверхностей поршневого узла значительно меньше. Отсюда можно сделать обоснованное заключение, что ресурс гидроцилиндра определяется износостойкостью деталей поршневого уплотнительного узла и, в частности, рабочей поверхностью отверстия передней крышки.

Для определения соответствия износов предельному значению общего

коэффициента полезного действия гидроцилиндров $\eta_c = 0,728$ применялся метод крутого восхождения.

Минимальное (X_{\min}) и максимальное (X_{\max}) значения выборки взяты из таблицы 4. Произведение $\beta_i \cdot \Delta X_i$ вычислялось по каждому фактору (табл. 10). Наибольшее значение по абсолютной величине составило 0,18 для U_{PC} (этот фактор принят как базовый).

В таблице 10 представлены параметры метода крутого восхождения. Указанные в таблице 10 факторы увеличивались от минимальных значений. Оптимизация проводилась до тех пор, пока общий коэффициент полезного действия не превысил значение 0,728.

Из таблицы 10 видно, что, в соответствии с выбранным шагом, наиболее близким к предельному значению общего коэффициента полезного действия

Т а б л и ц а 10
T a b l e 10

Параметры метода крутого восхождения
Parameters of the method of steep climbing

Параметр / Parameter	$U_{PC}, \text{ мкм} /$ $U_{PC}, \mu\text{m}$	$U_p, \text{ мкм} /$ $U_p, \mu\text{m}$	$U_G, \text{ мкм} /$ $U_G, \mu\text{m}$	$g_{ST}, \text{ мкм} /$ $g_{ST}, \mu\text{m}$	η_c
X_{\min}	86	30	24	120	
X_{\max}	728	242	164	2000	
β_i	$5,63 \cdot 10^{-4}$	$2,75 \cdot 10^{-4}$	$4,55 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	
ΔX	321	106	70	940	
X_{main}	407	136	94	1060	
$\beta_i \cdot \Delta X_i$	0,18	0,0292	0,0319	0,0141	
$\lambda_{\text{ш}} = \mu / \beta_0 $	17,762	36,364	21,978	666,667	
$\lambda_{\text{ш}}(\beta_i \cdot \Delta X_i)$	3,2	1,06	0,70	9,4	
Опыты на линии восхождения / Experiments on the line of ascent					
1	86	30	24	120	0,825
2	89,2	31,06	24,7	129,4	0,824
–	–	–	–	–	–
59	271,6	91,48	64,6	665,2	0,728
60	274,8	92,54	65,3	674,6	0,726
61	278	93,6	66	684	0,724

вия является значение 59 шага – 0,728. В связи с тем что значения износов не могут быть дробными, они округляются до целых. Таким образом, определены значения предельных износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров серии С: $U_{PC} = 272$ мкм, $U_P = 91$ мкм, $U_G = 65$ мкм, $g_{ST} = 665$ мкм. Коэффициент полезного действия гидроцилиндров при принятых значениях износов составляет 0,728.

Обсуждение и заключение

Стандовые испытания бывших в эксплуатации гидроцилиндров серии С показали, что по параметру общего коэффициента полезного действия

19,5 % гидроцилиндров эксплуатировались в запредельном состоянии.

Получена регрессионная модель связи общего коэффициента полезного действия гидроцилиндров серии С с износами рабочих поверхностей деталей, согласно которой их предельные значения составили: $U_{PC} = 272$ мкм, $U_P = 91$ мкм, $U_G = 65$ мкм, $g_{ST} = 665$ мкм. Полученные значения износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров серии С при их ремонте в условиях предприятий технического сервиса позволят принять решение о необходимости восстановления данных поверхностей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Величко С. А. Прогнозирование среднего ресурса гидроцилиндров, отремонтированных с восстановлением деталей электроискровым методом // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 120. С. 114–121. URL: <http://www.gosniti.ru/forms/t120.doc> (дата обращения: 20.05.2019).
2. Величко С. А., Сенин П. В., Чумаков П. В. Пути повышения межремонтного ресурса силовых гидроцилиндров // Ремонт, восстановление, модернизация. 2015. № 4. С. 36–41. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2229 (дата обращения: 20.05.2019).
3. Кинематический анализ причин отказов силовых гидроцилиндров автотракторной техники / В. Н. Водяков [и др.] // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 128. С. 47–54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29871178> (дата обращения: 20.05.2019).
4. Featured Temporal Segmentation Method and Adaboost-BP Detector for Internal Leakage Evaluation of a Hydraulic Cylinder / L. Lin [et al.] // Measurement. 2018. Vol. 130. Pp. 279–289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.08.029>
5. Cristescu C., Radoi R., Dumitrescu C., Dumitrescu L. Experimental Research on Energy Losses Through Friction in Order to Increase Lifetime of Hydraulic cylinders // 13th International Conference on Tribology. 2017. Vol. 174. Pp. 79–86. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/174/1/012011>
6. Нанозлектротехнологии для повышения межремонтного ресурса агрегатов машинно-тракторного парка сельского хозяйства / Ф. Х. Бурумкулов [и др.] // Труды ГОСНИТИ. 2007. Т. 99. С. 85–94. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28834809> (дата обращения: 20.05.2019).
7. Ivanov V. I., Solovov S. A., Velichko S. A., Ignatkov D. A. Analysis of Electric Pulsed Processes in Electrospark Treatment of Metallic Surfaces in a Gas Medium // Welding International. 2017. Vol. 31, no. 4. Pp. 312–319. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1257244>
8. The Properties of Nanocomposite Coatings Formed on a Steel 20 H Surface by Means of Electrospark Processing Using Rod-Shaped Electrodes of Steels 65 G and Sv 08 / F. Kh. Burumkulov [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2009. Т. 45. № 6. Pp. 455–460. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375509060039> (дата обращения: 20.05.2019).
9. Ресурсосбережение на основе повышения межремонтной наработки изделия / Ф. Х. Бурумкулов [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. 2008. № 5. С. 19–23. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11704166> (дата обращения: 20.05.2019).
10. Бурумкулов Ф. Х., Величко С. А., Чумаков П. В. Ресурсосбережение на основе повышения межремонтной наработки силовых гидроцилиндров // Труды ГОСНИТИ. 2012. Т. 109, № 1. С. 110–114. URL: <http://www.gosniti.ru/documents/articles/69.pdf> (дата обращения: 20.05.2019).
11. Formation of Thick Layer Electro-Spark Coatings for Restoring Worn-Out Parts of Power Hydraulic Cylinders / S. A. Velichko [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2017. Vol. 53, no. 2. Pp. 116–123. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375517020119>

12. Бурумкулов Ф. Х., Лялякин В. П., Пушкин И. А. Электроискровая обработка металлов – универсальный способ восстановления изношенных деталей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2001. № 4. С. 23–28. URL: http://foliant.ru/catalog/psulibr?BOOK_UP+00087B+0DF291+-1+-1 (дата обращения: 20.05.2019).

13. Кобзов Д. Ю., Усова С. В. Экспресс-диагностика несущей способности гидроцилиндров машин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3 (23). С. 174–179. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/ekspress-dagnostika-nesuschey-sposobnosti-gidrotsilindrov-mashin> (дата обращения: 20.05.2019).

14. Kobzov D., Kobzova I., Lkhanag D. Hydrocylinder Diagnostic Parameters // Systemi. Methodi. Tehnologii. 2009. № 3. Pp. 19–23. URL: https://brstu.ru/static/unit/journal_smt/docs/number3/19-23.pdf (дата обращения: 20.05.2019).

Поступила 18.03.2019; принята к публикации 10.05.2019; опубликована онлайн 30.09.2019

Об авторах:

Величко Сергей Анатольевич, преподаватель кафедры технического сервиса машин, Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, Россия, г. Саранск, пос. Ялга, ул. Российская, д. 5), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: G-9021-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, velichko2005@yandex.ru

Чумаков Павел Васильевич, преподаватель кафедры технического сервиса машин, Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, Россия, г. Саранск, пос. Ялга, ул. Российская, д. 5), кандидат технических наук, ResearcherID: G-8320-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8504-5907>, pav-chumakov@yandex.ru

Коломейченко Александр Викторович, заведующий кафедрой надежности и ремонта машин ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ» (302019, Россия, г. Орел, ул. Генерала Родина, д. 69), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: D-6053-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3865-4486>, kolom_sasha@inbox.ru

Заявленный вклад соавторов:

С. А. Величко – научное руководство, постановка задачи исследования, статистическая обработка данных, получение регрессионной модели связи общего коэффициента полезного действия гидроцилиндров с износими рабочими поверхностями деталей, защита докторской диссертации, в которую вошли представленные в данной статье научные результаты; П. В. Чумаков – анализ литературных данных, разработка методик, проведение экспериментальных исследований; А. В. Коломейченко – накопление статистических данных, анализ регрессионной модели и доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Velichko S.A. Prediction of the Average Life of Hydraulic Cylinders Repaired with the Restoration of Parts by the Electric Spark Method. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2015; 120:114-121. Available at: <http://www.gosniti.ru/forms/t120.doc> (accessed 20.05.2019). (In Russ.)

2. Velichko S.A., Senin P.V., Chumakov P.V. Ways of Increase of Overhaul Life of Power Cylinders. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya = Repair, Reconditioning, Modernization*. 2015; (4):36-41. Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2229 (accessed 20.05.2019). (In Russ.)

3. Vodakov V.N., Chumakov P.V., Velichko S.A., et al. Kinematic Analysis of the Causes of Failures of Power Cylinders Automotive Engineering. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2017; 128:47-54. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29871178> (accessed 20.05.2019). (In Russ.)

4. Lin L., Yixiang H., Jianfeng T., et al. Featured Temporal Segmentation Method and AdaBoost-BP Detector for Internal Leakage Evaluation of a Hydraulic Cylinder. *Measurement*. 2018; 130:279-289. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.08.029>

5. Cristescu C., Radoi R., Dumitrescu C., Dumitrescu L. Experimental Research on Energy Losses Through Friction in Order to Increase Lifetime of Hydraulic cylinders. *Proceedings of 13th International Conference on Tribology*. 2017; 174. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/174/1/012011>

6. Burumkulov F.Kh., Velichko S.A., Ivanov V.I., et al. Nanoelectro-Technologies for Increasing the Overhaul Life of Aggregates of the Machinery and Tractor Fleet of Agriculture. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2007; 99:85-94. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28834809> (accessed 20.05.2019). (In Russ.)
7. Ivanov V.I., Solovov S.A., Velichko S.A., Ignatkov D.A. Analysis of Electric Pulsed Processes in Electrosark Treatment of Metallic Surfaces in a Gas Medium. *Welding International*. 2017; 31(4):312-319. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1257244>
8. Burumkulov F.Kh., Senin P.V., Velichko S.A., et al. The Properties of Nanocomposite Coatings Formed on a Steel 20th Surface by Means of Electrosark Processing Using Rod-Shaped Electrodes of Steels 65 G and SV 08. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2009; 45(6):455-460. Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375509060039> (accessed 20.05.2019). (In Eng.)
9. Burumkulov F.Kh., Ivanov V.I., Velichko S.A., et al. Resource-Sparing on the Base of Increasing Product Operating Time Between Repairs. *Technika v selskom hozyaystve = Machinery in Agriculture*. 2008; (5):19-23. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11704166> (accessed 20.05.2019). (In Russ.)
10. Burumkulov F.Kh., Velichko S.A., Chumakov P.V. Resource Conservation through Improved Turnaround Practices of Power Cylinders. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2012; 109(1):110-114. Available at: <http://www.gosniti.ru/documents/articles/69.pdf> (accessed 20.05.2019). (In Russ.)
11. Velichko S.A., Senin P.V., Ivanov V.I., et al. Formation of Thick Layer Electro-Spark Coatings for Restoring Worn-Out Parts of Power Hydraulic Cylinders. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017; 53(2):116-123. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375517020119>
12. Burumkulov F.Kh., Lyalyakin V.P., Pushkin I.A. Electric-Spark Treatment of Metals – Universal Method of Restoring Worn Parts. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva = Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2001; (4):23-28. Available at: http://foliant.ru/catalog/psulibr?BOOK_UP+00087B+0DF291+-1+-1 (accessed 20.05.2019). (In Russ.)
13. Kobzov D.Y., Usova S.V. Rapid Diagnosis of Bearing Capacity of Hydraulic Machines. *Sovremennye tehnologii. Systemii analiz. Modelirovanie = Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2009; (3):174-179. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/ekspress-diaagnostika-nesushey-sposobnosti-gidrotsilindrov-mashin> (accessed 20.05.2019). (In Russ.)
14. Kobzov D., Kobzova I., Lkhanag D. Hydrocylinder Diagnostic Parameters. *Systemi. Methodi. Tehnologii = Systems. Methods. Technology*. 2009; (3):19-23. Available at: https://brstu.ru/static/unit/journal_smt/docs/number3/19-23.pdf (accessed 20.05.2019). (In Eng.)

Received 18.03.2019; revised 10.05.2019; published online 30.09.2019

About authors:

Sergey A. Velichko, Senior Lecturer of Technical Service Machines Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (5 Rossiyskaya St., Saransk 430904, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: G-9021-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, velichko2005@yandex.ru

Pavel V. Chumakov, Senior Lecturer of Technical Service Machines Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (5 Rossiyskaya St., Saransk 430904, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: G-8320-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8504-5907>, pav-chumakov@yandex.ru

Alexander V. Kolomeychenko, Head of the Chair of Reliability and Repair of Machines, Orel State Agrarian University (69 Generala Rodina St., Orel 302019, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: D-6053-2019, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3865-4486>, kolom_sasha@inbox.ru

Contribution of the authors:

S. A. Velichko – scientific guidance, formulation of the research problem, statistical data processing, obtaining a regression model of the overall efficiency of hydraulic cylinders with wear of the working surfaces of the parts, defense of the doctoral thesis with scientific results presented in this article; P. V. Chumakov – analysis of literary data, development of techniques, experimental studies; A. V. Kolomeychenko – accumulation of statistical data, analysis of the regression model and finalization the text.

All authors has read and approved the final manuscript.