

НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.9.047

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ШЕСТЕРЕННЫХ ГИДРОНАСОСОВ, ОТРЕМОНТИРОВАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ

© 2023 г. И. Н. Кравченко^{1,*}, С. А. Величко², А. В. Мартынов²,
О. В. Бармина¹, А. С. Апатенко³, Н. С. Севрюгина³

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,
Саранск, Мордовия, Россия

³Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия
*e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.12.2022 г.

После доработки 17.01.2023 г.

Принята к публикации 20.02.2023 г.

Статья посвящена оценке эффективности новой технологии ремонта шестеренных насосов с восстановлением изношенных поверхностей ресурсоопределяющих сопряжений деталей и повышением их износостойкости. Отремонтированные по предложенной технологии гидронасосы показали увеличение среднего межремонтного ресурса в условиях реальной эксплуатации в 1.07 раза по сравнению с ресурсом в доремонтный период эксплуатации.

Ключевые слова: шестеренный насос, ресурсоопределяющее сопряжение, средний межремонтный ресурс, электроискровая обработка, восстановление

DOI: 10.31857/S0235711923030094, **EDN:** PQIPGI

В гидравлической системе приводов управления навесными, полунавесными и прицепными орудиями сельскохозяйственных и промышленных тракторов, самоходных почвообрабатывающих и дорожных машин, эксплуатирующихся при большой запыленности применяются шестеренные насосы (НШ) серии А (круглые), предназначенные для нагнетания рабочей жидкости [1–3].

Техническое состояние гидронасосов определяется коэффициентом подачи [4, 5], значение которого для новых насосов составляет 0.92–0.95. За предельное состояние принимается его падение более чем на 40%.

Нормированный 80-процентный гамма-ресурс круглых шестеренных насосов составляет 6000 ч при условии соблюдения правил эксплуатации, технического обслуживания и хранения [6]. Однако в условиях реальной эксплуатации доремонтный ресурс не превышает 1800–2200 ч [7, 8].

Стандовый контроль технического состояния круглых шестеренных насосов, принятых на ремонт, показал [9, 10], что из исследуемой статистической партии 81% эксплуатировались в запредельном состоянии (рис. 1).

Для определения ресурсоопределяющих соединений деталей пар трения круглых шестеренных насосов серии А был проведен многофакторный регрессионный анализ статистической связи между зависимой переменной – коэффициентом подачи насосов (η_Q) и независимыми факторами – износами рабочих поверхностей деталей [11–14].

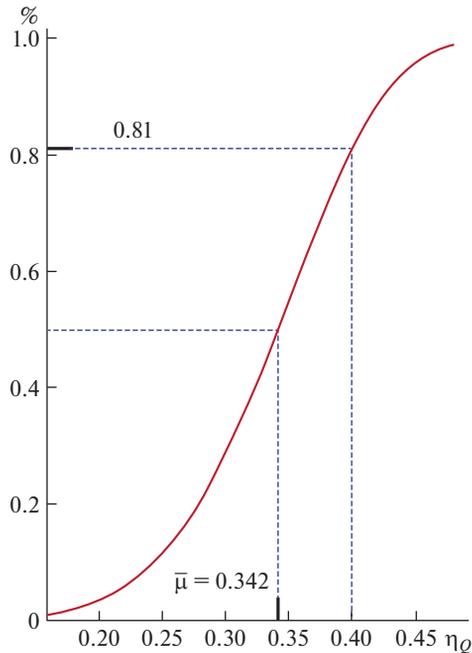


Рис. 1. Функция закона распределения Вейбулла коэффициента подачи насоса: форма – 0.365; масштаб – 5.288; математическое ожидание – 0.342.

Оценка значений стандартизованного коэффициента регрессии b_i , показывающего силу влияния независимых переменных на зависимую, показала, что наиболее значимое влияние оказывают: 1) износ поверхности цапф ведущей шестерни ($b_i = |0.706618|$); 2) износ поверхности цапф ведомой шестерни ($b_i = |0.536494|$); 3) износ поверхности подшипниковой полуобоймы под ведомую шестерню ($b_i = |0.526533|$); 4) износ поверхности подшипниковой полуобоймы под ведущую шестерню ($b_i = |0.40985|$). Таким образом, можно утверждать, что эти детали сопряжений являются ресурсопределяющими.

Поэтому разработана новая технологическая схема ремонта круглых шестеренных гидронасосов, включающая, расточку под ремонтный размер полуотверстий подшипниковой обоймы и создание на них измененного поверхностного слоя методом электроискровой обработки электродом из медьсодержащего сплава; нанесение на цапфы электроискрового покрытия электродом из среднеуглеродистой легированной стали с последующим шлифованием на размер [10, 15–17].

Важным достоинством применяемого метода является возможность наносить любые токопроводящие материалы, обеспечивая требуемые физико-механические и триботехнические свойства рабочих поверхностей деталей; высокая прочность сцепления металлопокрытия с основой, низкая энергоемкость процесса, простота выполнения технологических операций и др.

При разработке новых технологий надежность отремонтированных агрегатов оценивается по показателям гамма-процентного ресурса, а его эффективность – в сравнении показателей, оцененных в доремонтный период эксплуатации [18].

Целью исследования является определение среднего ресурса круглых шестеренных насосов в условиях эксплуатации, отремонтированных по новой технологии.

Таблица 1. Виды выполняемых работ и годовая наработка тракторов

Виды работ	Продолжительность работы в день, ч	Продолжительность работы, день	Годовая наработка трактора, ч
Пахота весенняя	8–10	8–10	64–100
Культивация	8–10	6–8	48–80
Посев яровых	8–10	8–10	64–100
Боронование	8–10	5–6	40–60
Внесение удобрений	10	15–30	150–300
Озимая пахота	8–10	10	80–100
Посев озимых	8–10	6–8	48–80
Работа с прицепом	4	20–25	80–100
Итого			574–920

Материалы и методы. Оценка надежности гидронасосов в доремонтный и межремонтный периоды эксплуатации проводили по плану $[N, U, r]$ [19]. Задавшись значением доверительной вероятности $\alpha = 0.95$ и по расчетному коэффициенту q (для новых гидронасосов $q = 1.458$, для отремонтированных $q = 1.398$), приняли требуемое для исследования количество гидронасосов: новых $N_n = 33$ шт., отремонтированных $N_{рем} = 40$ шт.

Тогда при $N_n = 33$ шт. вероятности безотказной работы $P(t) = 0.80$ и доверительной вероятности $\alpha = 0.95$ [19], число отказов r для оценки гамма-процентных показателей ресурса принято 3 штуки [20]. Для $N_{рем} = 40$ шт. при тех же значениях вероятности безотказной работы и доверительной вероятности число отказов $r = 5$ штук.

Новые и отремонтированные гидронасосы после оценки технического состояния на стенде КИ-4815М устанавливались на трактора, занятые на сельскохозяйственных работах. Исследования проведены в период 2011–2022 гг.

Виды выполняемых работ и годовая наработка тракторов представлена в табл. 1. Общая годовая наработка гидронасосов составила 5166–8280 ч со средним значением 6723 ч.

В качестве средств измерения и контроля технического состояния гидронасосов во время эксплуатации использовали: реверсивный расходомер РФИК 120 АВ0Т (рис. 2), секундомер, запорные устройства А-0/75-4616 320 и металлическую линейку.

Гидронасосы, функциональные параметры которых превышали предельные, снимались с эксплуатации, при этом фиксировалась их наработка. По достижению количества отказов r остальные, не отказавшие гидронасосы, также снимались с эксплуатации с фиксацией наработки.

Результаты исследований и обсуждение. *Гамма-процентный ресурс круглых шестеренных насосов в доремонтный период рядовой эксплуатации.*

По результатам контрольных наблюдений за агрегатами по плану $[N, U, r]$ [19] получены следующие исходные данные для оценки показателей ресурса: 30 выборочных значений наработки t ч до цензурирования (Censored) (90.9%) и 3 выборочных значения наработки t ч до отказа (Complete) (9.1%).

Проверка, как крайних, так и любых других смежных точек выборки при $N_n = 33$ шт. по критерию Ирвина показала, что первая точка информации $t_{др}^1 = 930$ ч является достоверной точкой ($\lambda_{оп} = 0.04 < \lambda = 1.1$) и ее следует учитывать при дальнейших расчетах, последняя точка информации $t_{др}^{33} = 2490$ ч также является достоверной ($\lambda_{оп} = 0.4 < \lambda = 1.6$) и ее следует учитывать при дальнейших расчетах. Таким образом, выпадающей наработки нет.



Рис. 2. Реверсивный расходомер RFIK 120 АВОТ.

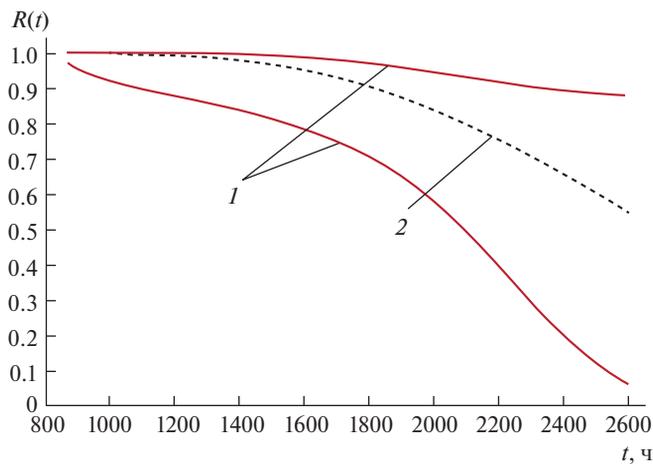


Рис. 3. Функция вероятности безотказной работы новых гидронасосов: 1 – доверительный интервал; 2 – линия времени отказа гидронасосов.

Из приведенного статистического ряда видно, что до наработки 1100 ч отказов агрегатов не было, т.е. параметр положения распределения больше нуля.

С использованием программы “Statistica” [21] методом максимального правдоподобия установлены следующие параметры закона: смещение – $t_{см} = 852$ ч; форма – $b = 2.91$; масштаб – $a = 2083.5$ ч.

Функция вероятности безотказной работы новых гидронасосов, оцененная методом максимального правдоподобия, представлена на рис. 3.

Результаты сравнения теоретической функции вероятности безотказной работы (рис. 3) с непараметрической оценкой Каплана–Мейера (рис. 4) по критерию Холландера–Прошана

Таблица 2. Качество подгонки распределения Вейбулла по критерию Холландера–Прошана

Критерий	Качество подгонки Объем выборки $N = 33$ (отказы – 3, цензурированные – 30) Параметры: положение = 852, форма = 2.91, масштаб = 2083.5	
	значение критерия	уровень значимости p
Hollander–Proschan (HP)	1.389242	0.16476

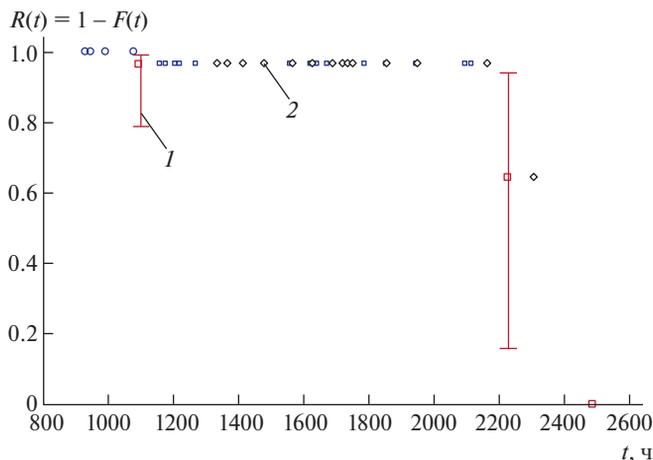


Рис. 4. График вероятности безотказной работы и 95-процентный доверительный интервал, оцененный по методу Каплана–Мейера: 1 – наработка отказавших гидронасосов; 2 – наработка неотказавших гидронасосов.

дера–Прошана показывают, что качество подгонки статистических данных с оцененными параметрами закона распределения Вейбулла не противоречит выдвинутой гипотезе (табл. 2).

По параметрам закона с учетом значения коэффициента $K_b = 0.89$ и квантиля распределения закона Вейбулла $H_k = 0.607$ определены средний ресурс и 80-процентный гамма-ресурс круглых шестеренных насосов в доремонтный период рядовой эксплуатации.

Гамма-процентный ресурс отремонтированных по новой технологии круглых шестеренных насосов в межремонтный период рядовой эксплуатации.

По результатам контрольных наблюдений по плану $[N, U, r]$ за агрегатами получены следующие исходные данные для оценки показателей ресурса: 35 выборочных значений наработки t ч до цензурирования (Censored) (87.5%) и 5 выборочных значений наработки t ч до отказа (Complete) (12.5%).

Проверка, как крайних, так и любых других смежных точек выборки при $N = 40$ шт. по критерию Ирвина показала, что первая точка информации $t_{\text{мп}}^1 = 400$ ч является выпадающей ($\lambda_{\text{оп}} = 1.27 > \lambda = 1.1$) и ее не следует учитывать при дальнейших расчетах, последняя точка информации $t_{\text{мп}}^{40} = 2930$ ч является достоверной точкой ($\lambda_{\text{оп}} = 0.22 < \lambda = 1.6$) и ее следует учитывать при дальнейших расчетах. Учитывая, что первая точка информации выпала, дальнейшие расчеты проведены при $N = 39$ шт. [19, 20].

Таблица 3. Качество подгонки распределения Вейбулла по критерию Холландера–Прошана

Критерий	Качество подгонки Объем выборки $N = 39$ (отказы – 5, цензурированные – 39) Параметры: положение = 998, форма = 2.77, масштаб = 2147.3	
	значение критерия	уровень значимости p
Hollander–Proschan (HP)	0.723572	0.46933

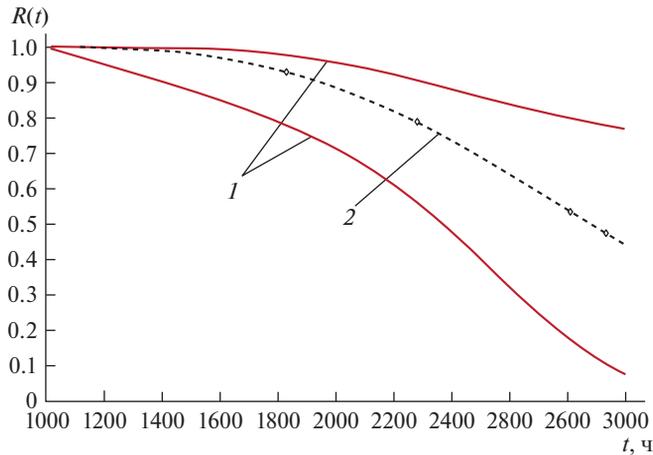


Рис. 5. Функция вероятности безотказной работы отремонтированных гидронасосов: 1 – доверительный интервал; 2 – линия времени безотказной работы гидронасосов.

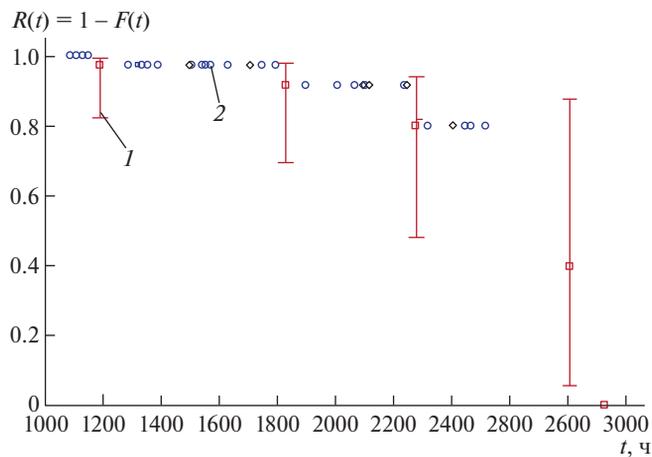


Рис. 6. График вероятности безотказной работы и 95-процентный доверительный интервал, оцененный по методу Каплана–Мейера: 1 – наработка отказавших гидронасосов; 2 – наработка неотказавших гидронасосов.

Из приведенного статистического ряда видно, что до наработки 1190 ч отказов агрегатов не было, т.е. параметр положения распределения больше нуля.

В программе “Statistica” [21] с использованием метода максимального правдоподобия определили параметры закона: $t_{cm} = 998$ ч; $a = 2147.3$ ч; $b = 2.77$.

Функция вероятности безотказной работы отремонтированных гидронасосов, оцененная методом максимального правдоподобия, представлена на рис. 5.

Сравнение теоретической функции вероятности безотказной работы (рис. 5) с непараметрической оценкой Каплана–Мейера (рис. 6) по критерию Холландера–Прощана показывает, что качество подгонки статистических данных с оцененными параметрами закона распределения Вейбулла не противоречит выдвинутой гипотезе (табл. 3).

Таблица 4. Значения средних ресурсов насосов навесных гидросистем тракторов в доремонтный ($T_{др}$, ч) и межремонтный ($T_{мр}$, ч) периоды реальной эксплуатации

$T_{др}$, ч	$T_{мр}$, ч	$\frac{T_{мр}}{T_{др}} \times 100$
2706.3	2909.1	107

По установленным параметрам с учетом значения коэффициента $K_b = 0.89$ и квантиля распределения закона Вейбулла $H_k = 0.607$ определены средний ресурс и 80-процентный гамма-ресурс круглых шестеренных насосов в межремонтный период рядовой эксплуатации (табл. 4).

Результаты анализа табл. 4 показывают, что отремонтированные по новой технологии гидронасосы НШ серии А имеют средний межремонтный ресурс в условиях реальной эксплуатации в 1.07 раза выше по сравнению с ресурсом в доремонтный период эксплуатации.

Заключение. Полученные результаты оценки среднего ресурса в доремонтный и межремонтный периоды реальной эксплуатации гидронасосов НШ серии А показывают высокую эффективность применения метода электроискровой обработки для восстановления изношенных поверхностей деталей и повышения износостойкости ресурсопределяющих сопряжений.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГСТУ 3-25-180-97. Насосы шестеренчатые “Гидросила”.
2. *Басинюк В.Л., Калининченко А.С., Усс И.Н. и др.* Система мобильного мониторинга гидропривода навесных устройств энергонасыщенных тракторов // Наука и техника. 2013. № 5. С. 49.
3. *Чумаков П.В., Мартынов А.В., Коломейченко А.В. и др.* Оценка технического состояния круглых шестеренных гидронасосов навесных гидросистем тракторов // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30. № 3. С. 426.
4. РТМ 70.0001.246-84. Критерии предельного состояния тракторов и их составных частей. М.: ГОСНИТИ, 1985. 11 с.
5. Агрегаты гидроприводов сельскохозяйственной техники. Технические требования на капитальный ремонт ТК 70.0001.018-85. М.: ГОСНИТИ, 1986. 152 с.
6. *Ермолов Л.С., Кряжков В.М., Черкун В.Е.* Основы надежности сельскохозяйственной техники. М.: Колос, 1974. 223 с.
7. *Черкун В.Е.* Ремонт тракторных гидравлических систем. М.: Колос, 1984. 253 с.
8. ЗАО “Гидросила ГРУП” [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.hydroсила.com/publications>.
9. *Бурумжулов Ф.Х., Величко С.А., Ионов П.А.* Ресурс и допустимое значение коэффициента полезного действия шестеренных круглых гидронасосов // Техника в сельском хозяйстве. 2011. № 2. С. 26.
10. *Сенин П.В., Нуязин Е.А., Ионов П.А.* Восстановление круглых шестеренных гидронасосов типа НШ-К комбинированным методом // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 10. С. 42.
11. *Черкун В.Е., Довгаль А.М., Костеляни А.В.* Влияние зазора корпус–поджимная обойма, износов основных деталей и манжеты радиального уплотнения на работу гидронасоса НШ-50-2 // Научные труды УСХА. 1979. Вып. 227. С. 34.
12. *Дидур В.А., Ефремов В.Я.* Диагностика и обеспечение надежности гидроприводов сельскохозяйственных машин. Киев: Техніка, 1986. 128 с.

13. Бурумжулов Ф.Х., Лельчук Л.М., Осин А.М. и др. Метод прогнозирования вероятности отказа и ресурса восстановленных деталей по результатам лабораторно-стендовых испытаний и эксплуатационных наблюдений // Работы в области восстановления и упрочнения деталей: материалы семинара. Ч. II. Москва, 1991. С. 108.
14. Денисов В.А., Задорожный Р.Н. Оценка эксплуатационной надежности восстановленных деталей по результатам ускоренных стендовых испытаний // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 127. С. 160.
15. РД 50-460-84. Методические указания. Обеспечение износостойкости изделий. Метод экспериментальной оценки пластичности поверхностных слоев деталей машин. М.: Издательство стандартов, 1976. 35 с.
16. Гаркунов Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безизносности при трении. Водородное изнашивание металлов. М.: Изд-во МСХА, 2004. 383 с.
17. Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / Под ред. Ю.Н. Дроздова. М.: Эко-Пресс, 2010. 604 с.
18. Емельянов С.Г., Лукашев Е.А., Олейник А.В. и др. Технологическое обеспечение эксплуатационной надежности машин и оборудования / Под ред. М.Е. Ставровского. Курск: Изд-во Юго-Запад. гос. ун-та, 2010. 303 с.
19. Кравченко И.Н., Пучин Е.А., Чепурин А.В. и др. Оценка надежности машин и оборудования: теория и практика / Под ред. И.Н. Кравченко. 2-е изд. М.: ИНФРА-М, 2017. 336 с.
20. Сковородин В.Я., Тишкин Л.В. Справочная книга по надежности сельскохозяйственной техники. Л.: Лениздат, 1985. 204 с.
21. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTIKA. М.: Горячая линия – Телеком, 2013. 288 с.